

## Bachelorarbeit

# Digitale Kalibrierung mehrkanaliger SAR-Systeme

Fairouz Stambouli

Betreuer: Dr.-Ing. Marwan Younis  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Zwick

Zeitraum: 01.08.2014 – 29.10.2014

Karlsruhe, den 29.10.2010



Postanschrift: Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik  
Kaiserstraße 12  
D-76131 Karlsruhe

Gebäude: Engesserstraße 5, Geb. 30.10

Tel.: +49 (0) 721 608 4 2522  
Skr.: +49 (0) 721 608 4 2523  
Fax: +49 (0) 721 608 4 5027  
E-Mail: [info@ihe.kit.edu](mailto:info@ihe.kit.edu)  
Web: [www.ihe.kit.edu](http://www.ihe.kit.edu)





# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Dem Abteilungsleiter Radarkonzepte, Herrn Dr. Gerhard Krieger, danke ich für seine stets Interesse an meiner Arbeit.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dr. Marwan Younis, der mir ein solches innovatives Thema für meine Bachelorarbeit vorgeschlagen und mir die Chance gegeben hat, für drei Monaten einen Teil dieses Instituts zu sein. Ich danke ihm erstens für die stetige Unterstützung, die anregende Diskussionen zur meiner Arbeit, die wertvolle Ratschläge und die ständige Hilfe, ohne die eine solche Arbeit nicht hätte entstehen können. Für das in mich gesetzte Vertrauen und für seine wertvolle Zeit, die er für mich aufgewendet hat möchte ich ihm auch danken. Obwohl ich nur drei Monate beim Institut war habe ich von ihm viel gelernt und mich selbst weiterentwickelt. Es war für mich eine Ehre mit ihm zusammenzuarbeiten.

Ein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter Herrn Dr. Alberto Moreira, welcher mich immer unterstützt hat, und mit seiner großen Erfahrung immer bereit war, mich zu beraten und mir zu helfen. Meinen Dank aussprechen möchte ich auch auch bei Frau Dr. Federica Bordoni und Herrn Dr. Sigurd Huber für ihre kompetente Anmerkungen und Ratschläge zur Anordnung der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Arbeitskollegen Herrn Daniel Rosigkeit, Andre Silva und Jalel Matar für ihre Unterstützung und die tolle und interessante Arbeitsatmosphäre, die ich vermissen werde. Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Institut möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Nicht zuletzt widme ich meine Arbeit meinem lieben Vater. Ich denke meiner Mutter und meiner Schwester sowie meinen Freunden, welche mich immer moralisch unterstützt und an mich geglaubt haben, denn ohne sie wäre dieser Arbeit niemals möglich gewesen.



“It always seems impossible until it’s done”

Nelson Mandela



# Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Fernerkundung mit SAR (Radar mit synthetischer Apertur) signifikant weiterentwickelt. Insbesondere für weltraumgestützte Systeme ist SAR ein zukunftssträchtiges System mit der Fähigkeit, unabhängig von Tag und Nacht hochauflösende Bilder der Erdoberfläche zu liefern. Dank seiner vielen Einsatzmöglichkeiten, wie zum Beispiel die Umweltüberwachung, Meereskunde und Katastrophenmanagement, ist SAR eine zuverlässige Informationsquelle. Um die hohen Anforderungen an die Qualität der gelieferten Aufnahmen zu erfüllen, ist eine genaue Kalibrierung der aufgenommenen Messdaten notwendig. Hierfür kommen hochentwickelte Kalibrierverfahren zum Einsatz.

Ein klarer Trend für zukünftige SAR Systeme ist die Nutzung von Techniken der digitalen Strahlformung. Eine Anwendung der jetzigen Kalibrierverfahren auf derartigen mehrkanal SAR-Systemen ist nur mit erheblichem Aufwand möglich und erfordert eine hohe Komplexität. Des Weiteren sind diese Verfahren nicht in der Lage, eine Kalibrierung in Echtzeit durchzuführen. Ein vielversprechender Kandidat ist die sogenannte digitale datenbasierte Kalibrierung, welche in dieser Arbeit untersucht wird. Dabei werden die Fehler anhand der eigentlichen SAR-Messdaten bestimmt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich im ersten Schritt mit der Kalibrierung von konventionellen SAR-Systeme und deren Einschränkungen. Im zweiten Schritt kommt eine Übersicht der digitalen Mehrkanal Kalibriertechniken, welche die Nachteile und Komplexität der konventionellen Systeme überwindet. Dabei wird ein innovativer Algorithmus implementiert, basierend auf die Korrelation zwischen den Antennenelementen. Nach der theoretischen Untersuchung des Verfahrens folgt eine Auswertung anhand der Simulierten Daten. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf die Kalibrierungsstrategien zukünftiger SAR-Systeme ab.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Das Radarsystem mit synthetischen Apertur . . . . .	1
1.2	Stand der Technik . . . . .	2
1.3	Die Motivation hinter dieser Arbeit . . . . .	2
1.4	Schwerpunkte und Aufbau dieser Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Die Welt der Kalibrierung</b>	<b>5</b>
2.1	Zweck der Kalibrierung . . . . .	5
2.1.1	Ursachen von Fehlern . . . . .	5
2.1.2	Die Bedeutung der Kalibrierung . . . . .	6
2.2	Interne Kalibrierung . . . . .	6
2.2.1	Interne Gerätekalibrierung . . . . .	6
2.2.2	Zuverlässigkeit der internen Kalibrierung . . . . .	8
2.3	Externe Kalibrierung . . . . .	9
2.3.1	Geometrische Kalibrierung . . . . .	11
2.3.2	Radiometrische Kalibrierung . . . . .	11
2.4	Probleme bei den konventionellen SAR-Systemen . . . . .	11
2.5	Digitale mehrkanalige SAR Kalibrierung . . . . .	12
2.5.1	Mehrkanaliges Azimut-Empfangssystem . . . . .	14
2.5.2	Mehrkanaliges Elevation-Empfangssystem . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Digitale datenbasierte Kalibrierung mehrkanaliger SAR-Systeme (DigiCal)</b>	<b>19</b>
3.1	Entwicklungsgeschichte der datenbasierten Kalibrierermethode . . . . .	19
3.2	Konzept der digitalen datenbasierten Kalibrierung . . . . .	20
3.3	SAR-Modell Beschreibung . . . . .	21
3.3.1	Eigenschaften der Reflektivität . . . . .	21
3.3.2	Eigenschaften des Strahls . . . . .	23
3.4	Analytische Modellierung der empfangenen Signale . . . . .	24
3.4.1	Empfangssignals eines einzelnen Punktstreuer . . . . .	24
3.4.2	Darstellung des empfangenen Signals durch alle Punktstreuer . . . . .	25
3.5	Autokorrelation zwischen Antennenelementen . . . . .	25
3.5.1	Simulation der Autokorrelationsfunktion . . . . .	25
3.6	Kreuzkorrelation zwischen Antennenelementen . . . . .	27
3.6.1	Simulation der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennenelemente . . . . .	29

3.7	Simulationsumgebung mit Fehler . . . . .	30
3.7.1	Theoretische Untersuchung der fehlerbehafteten Empfangssignale . . . .	30
3.7.2	Kreuzkorrelationsfunktion zwischen fehlerbehafteten Empfangssignale . .	31
3.7.3	Simulation der fehlerbehafteten Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennenelementen . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Simulationsergebnisse der DigiCal</b>	<b>35</b>
4.1	Vergleich und Restfehler . . . . .	35
4.2	Gruppenfaktor . . . . .	36
4.3	Vergleich verschiedene Elementabstände . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>41</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>43</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Interne Kalibrierungsprozess unter Verwendung von TR-Modulen . . . . .	7
2.2	Blockschaltbild eines Transmit/Receive Moduls (TRM) . . . . .	8
2.3	Shema eines Winkelreflektors . . . . .	10
2.4	Blockschaltbild Transponders . . . . .	10
2.5	Konventionelle SAR-Systeme und ihre Möglichkeiten bzgl Auflösung und Streifenbreite . . . . .	12
2.6	Mehrkanal SAR-System . . . . .	13
2.7	Strahlen eines Mehrkanal SAR-Systems in Azimut . . . . .	14
2.8	Blockschaltbild eines mehkanaligen SAR-System in Azimut . . . . .	15
2.9	Strahlsteuerungstechnik eines mehkanaligen SAR-Systems in Elevation . . . . .	16
2.10	Strahlsteuerungssystem eines Mehrkanal SAR-System in Elevation . . . . .	17
3.1	Blockschaltbild des Konzepts der digitalen datenbasierten Kalibrierung . . . . .	20
3.2	SAR-Modell . . . . .	21
3.3	Streuprozess der Punktziele . . . . .	22
3.4	Verteilung der Punktstreuer und ihre Reflektivität . . . . .	22
3.5	Korrelation zwischen den Punktsteuer . . . . .	23
3.6	Anennendiagramm . . . . .	23
3.7	Lineares Antennensystem für die Darstellung des durch einen Punktstreuer empfangenen Signals . . . . .	24
3.8	Die Reflektivitätsverteilung ohne Berücksichtigung des Antennendiagramms und die resultierenden Autokorrelation zwischen Antennenelementen. . . . .	26
3.9	Die Reflektivitätsverteilung unter Berücksichtigung eines schmalen Antennendiagramms und die resultierenden Autokorrelation zwischen Antennenelementen. . . . .	26
3.10	Die Reflektivitätsverteilung unter Berücksichtigung eines breiten Antennendiagramms und die resultierenden Autokorrelation zwischen Antennenelementen. . . . .	27
3.11	Korrelation mit dreiecks-Funktion . . . . .	28
3.12	Korrelation mit Delta Funktion . . . . .	28
3.13	Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennenelementen für 500 Realisierungen von jeweils 1000 Punktstreuern : Amplitude und Phase . . . . .	29
3.14	Mittelwert alle Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Antennenelemente : Amplitude und Phase . . . . .	30
3.15	Blockschaltbild der Simulationsumgebung mit Systemfehler . . . . .	31

3.16 Fehlerbehafteten Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennensignalen über 500 Realisierungen von 1000 Punktstreuern: Amplitude und Phase . . . . .	32
3.17 Mittelwert der fehlerbehafteten Kreuzkorrelationsfunktion: Amplitude und Phase	33
4.1 Vergleich zwischen den Kreuzkorrelationsfunktionen des fehlerfreien System (bekannt) in Blau und des fehlerbehafteten(gemessen) in Rot . . . . .	36
4.2 Restfehlermatrize, wobei die Farbige Positionen der logarithmischen Darstellung der Phasenfehler entspricht . . . . .	37
4.3 Die Restfehler über den Abstand als Mittelwert der Elemente jeder Spalte von Restfehlermatrize . . . . .	38
4.4 Ergebnis der Simulation: Gruppenfaktor für den idealen Fall(rot), der mittels des Algorithmus zurückgewonnen Gruppenfaktor(blau), der wegen des Phasenfehlers verzerrte Gruppenfaktor(grün) . . . . .	38
4.5 Vergleich der Effizienz des DigiCal Algorithmus zwischen die Anordnung in Elevation und in Azimut . . . . .	39

# 1 Einleitung

Die Erfindung der Photographie geht auf das frühe 19. Jahrzehnt zurück. Die Aufnahme des ersten Luftbildes der Erdoberfläche erfolgte 1858 von einem Ballon aus. Mit der Entwicklung des Flugzeugs starteten die praktischen Anwendungen von Luftbildern. Ihre Akquisition begann im ersten Weltkrieg, wobei die Aufnahmetechniken verbessert und die systematische Reihenaufnahme eingeführt wurden. Während des zweiten Weltkriegs wurden Luftaufnahmen intensiv durch das Militär eingesetzt. Dabei war nicht nur der Bereich des sichtbaren Lichtes im Gebrauch sondern auch andere Bereiche des elektromagnetischen Spektrums wie zum Beispiel der Infrarot- und Mikrowellenbereich. Erst in den 60er Jahren entstand die Fernerkundung als ein eigener Wissenszweig. Von diesem Zeitpunkt ab hat sich die Entwicklung der Fernerkundung kontinuierlich fortgesetzt. Durch die laufenden technischen Verbesserungen hat die Fernerkundung in vielen Zweigen der Wissenschaft und Wirtschaft erheblich an Bedeutung gewonnen insbesondere nach der Erscheinung des Radar-Systems. Dabei wurden Mikrowellensensoren und spezielle Radarsysteme, die Tag und Nacht betrieben sind und Wolken durchdringen können sehr schnell mit der Zeit entwickelt.

## 1.1 Das Radarsystem mit synthetischen Apertur

Während der ersten Jahrzehnte hatten die Radar-Systeme die Fähigkeit, nur künstlichen Zielen wie zum Beispiel Flugzeugen und Schiffen zu detektieren. Wegen bestimmten Anforderungen waren fast alle Radar-Systeme am Boden installiert. Seitdem haben sich die Radartechnologie und ihre zugehörige Signalverarbeitung sehr schnell entwickelt. Mit der Erfindung der synthetischen Apertur konnte die Auflösung in Flugrichtung verbessert werden. Carl Wiley hatte im Jahre 1954 beobachtet, dass es ein Zusammenhang zwischen der Weg-Komponente eines zurückgestrahlten Signal und dem [1]. Daraus war das SAR geboren. Das Prinzip des SAR-Systems beruht auf die kohärente Addition nacheinander aufgezeichneter Echos während der Bewegung des Radars. Seit mehr als 30 Jahren findet das SAR weiterhin Anwendungen bei der Fernerkundung der Erde. Es gab damals eine große Erwartung über die Zukunft der Radarfernerkundung. Heutzutage ist das SAR-System in ein goldenes Zeitalter zugeführt. Mehr als 15 satellitengestützte SAR-Sensoren sind im Betrieb und ungefähr 10 neue SAR-Missionen werden innerhalb der nächsten 5 Jahren starten. Die Vision für diese satellitengestützte Radarsysteme sieht vielversprechend aus. Die SAR-Aufnahmen haben Heutzutage viele universale Anwendungen, wie zum Beispiel Katastrophenmanagement, Land- und Meer-Verkehrsbeobachtung, breite

Gebietsüberwachung sowie Umweltüberwachung. Im Gegensatz zur optischen Sensoren sind alle diese Anwendungen unabhängig von Wetter und Lichtverhältnisse. Dazu ist die Wirkung der Wolken, Nebel und Regen für die Verbreitung der elektromagnetischen Wellen des Radars vernachlässigbar.

## 1.2 Stand der Technik

SAR ist eine bewährte Bildtechnik für die Erdbeobachtung. Allerdings sind konventionelle SAR-Systeme, basierend auf eine einzelne Sende- und Empfangsapertur inhärent eingeschränkt. Sie haben nicht die Fähigkeit eine hohe geometrische Auflösung und eine umfangreiche Streifenbreite gleichzeitig zu liefern. Dazu können diese Methoden nur mittels der sogenannten Transmit/Receive-Module eingesetzt werden, die die Ablenkung des Hauptstrahles durch Phasenmesser steuern. Um die Einschränkungen der konventionellen SAR-Systeme zu überwinden sind mehrere innovative Methoden entwickelt worden, wobei die empfangene Antenne in mehrere Unteraperturen aufgeteilt wird. Diese Unteraperturen sind mit einzelnen Empfangskanälen verbunden, was einer Digitalisierung einzelner Signale entspricht. Durch den gleichzeitigen Empfang über alle Kanäle werden mehr Informationen über die Richtung des zurückgestrahlten Radarechos gewonnen. Allerdings wird die Kalibrierung solches Systems komplexer und aufwendiger.

## 1.3 Die Motivation hinter dieser Arbeit

Ohne die Kalibrierung können die SAR-Aufnahmen nie eine solche hohe Qualität erreichen. Deshalb stellt die Kalibrierung von SAR-Systemen eine notwendige Aufgabe dar. Es ist daher zu fragen, was die Kalibrierung überhaupt ist und wieso sie so erforderlich ist. Außerdem ist die Kalibrierung von mehrkanaligen Systemen durch die klassische Einspeisung eines Kalibriersignals und Auswertung am Boden gekennzeichnet. Die Systemfehler können daher nicht in Echtzeit behoben werden. Die zunehmende Entwicklung innovativer SAR-Systemen stellt neue Herausforderungen an die Kalibrierung. Um das SAR-System in Echtzeit kalibrieren zu können sollen die im Signal auftretenden Fehler im Satellit korrigiert werden. Deshalb ist es essentiell Algorithmen ohne großen Rechenaufwand zu entwickeln. Eine vielversprechende Methode ist die digitale datenbasierte Kalibrierung, die in [2] entwickelt wurde und im Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht, weiterentwickelt und implementiert wird.

## 1.4 Schwerpunkte und Aufbau dieser Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Algorithmus für die digitale datenbasierte Kalibrierung vorgestellt. Eingangs werden im Kapitel 2 der Zweck der Kalibrierung und die verschiedene Kalibrierver-

fahren mit ihrer aktuellen Problemen erläutert. Dabei wird die interne Kalibrierung als erstes betrachtet dann am Wichtigsten kommt das mehkanalige SAR-System. Der Schwerpunkt der Arbeit ist in Kapitel 3 die Implementierung der DigiCal. Zu Beginn wird die Entwicklungsgeschichte dieses Algorithmus vorgestellt dann folgt sein Konzept mit der theoretischen Untersuchung. Anhand von Simulation werden als nächstes die wichtigsten Voraussetzungen für eine effiziente Kalibrierung erläutert. Ergebnisse dieses Algorithmus sind am Ende der Arbeit in Kapitel 4 dargestellt. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen der digitalen datenbasierten Kalibriermethoden.





## 2 Die Welt der Kalibrierung

Jedes Abbildungsverfahren sollte die Signaturen der Zielobjekte möglichst genau verfassen. Um die Daten aufzuarbeiten und sinnvolle Informationen zu sammeln ist es dringend notwendig diese Daten zu kalibrieren. Mit der Entwicklung der neuen SAR Technologie ist es wichtig geworden, diese Daten zu kalibrieren.

Um was handelt sich genau die Kalibrierung? Wieso ist sie so notwendig für den Datenprozess? Was sind die verschiedenen Kalibrierungsverfahren und inwiefern sind sie zuverlässig ? Diese Fragen werden im Folgenden nachgegangen.

### 2.1 Zweck der Kalibrierung

In allen technischen Systemen treten Fehler auf. Die Menschen können nie perfekt sein und ebenfalls die Technologie. Ingenieure und Wissenschaftler arbeiten Tag für Tag um diese technische Systeme möglich optimal und fehlerfrei zu gestalten. In der Fernerkundung mit SAR sind diese Fehler sehr wichtig und niemals vernachlässigbar da sie die Qualität der SAR-Daten verschlechtern können. Der Zweck der Kalibrierung besteht darin, die Auswirkung der bekannten Fehler zu minimieren [3]. Viele SAR Radarsysteme waren trotz der unzureichenden kalibrierten Daten erfolgreich. Ein Beispiel dafür ist das SEASAT SAR [4]. Für den qualitativen Einsatz werden jedoch kalibrierte Daten benötigt. Wissenschaftler können nur mit kalibrierten SAR Daten geophysikalische Kenngrößen aus der Rücksteuermessungen unter Verwendung von Modelle extrahieren, Daten aus verschiedene Sensoren vergleichen, multitemporale Großflächige Beobachtungen führen und eine Datenbasis von Rücksteuermessungen für unterschiedliche Geländetypen und Einfallswinkel bilden [5]. Im Folgenden werden die verschiedene Fehlerarten diskutiert und die genaue Bedeutung der Kalibrierung erläutert.

#### 2.1.1 Ursachen von Fehlern

Instrumentale Abweichung von dem optimalen Betrieb, Kurz- und Langzeitdrift, Fehleranpassung und Kopplung zwischen den RF Pfade können im Radarsystem gemessen werden[3] Externe Effekte, wie die atmosphärische und ionosphärische Störungen können auch das System beeinflussen.

### 2.1.2 Die Bedeutung der Kalibrierung

Die Kalibrierung ist laut dem Internationalen Amt für Maße und Gewichte (BIPM) definiert als einen Arbeitsgang, der unter festgelegten Zuständen in einem ersten Schritt ein Zusammenhang zwischen den Größenwerten mit einer von Normal bereitgestellten Messunsicherheit und entsprechenden Anweisungen mit zugehörigen Messunsicherheit (vom kalibrierten Messgerät oder Sekundärnormal) herstellt und in einem zweiten Schritt diese Informationen benutzt, um ein zu einem Messergebnis hinsichtlich des Hinweises führende Zusammenhang zu herstellen [6].

Hinsichtlich der Fernerkundung besteht der Kalibrierungsprozess darin, die Übertragungsfunktion des analysierten SAR-Systems bezüglich eines vordefinierten Bezugssystems zu bestimmen. Die Signale sind dementsprechend in physikalischen Informationen umgewandelt, die auf der Radarquerschnitt (RCS) oder der Rücksteuerkoeffizient beziehen [7]. Im Wesentlichen basiert die Kalibrierung auf der Nutzung von am Boden pre-launch charakterisierten Daten, genauen Antennenmodellen, im Flug internen Charakterisierung und externen Kalibrierdaten mit zusätzlichen Flugmessungen.

## 2.2 Interne Kalibrierung

Das SAR System ist am Boden charakterisiert. Die Temperatur, Alterung der Bauelemente sowie andere Faktoren beeinflussen die Systemkenngrößen und verursachen deswegen systematische Fehler. Deshalb soll eine interne Kalibrierung eingeführt werden um diese Fehler während der betrieblichen Datenerfassung zu minimieren. Diese Art von Kalibrierung kann direkt am Sensor vorgenommen werden. Um das System möglich stabil zu halten müssen erst die auftretende Störgröße erfasst werden. Während der Datenübernahme kann die interne Hardware-Eigenschaften auch den Signalweg verfälschen und Phasenschwankungen verursachen [7].

### 2.2.1 Interne Gerätekalibrierung

Das Design der internen Kalibrierungstechnologie ermöglicht eine Kennzeichnung des Verhaltens der Radargeräte unter realistischen Voraussetzungen. Die Grundidee darunter besteht darin, Kalibrierpulse durch geeignete Kalibrierungsnetze in den Signalpfad einzuspeisen. Die Kalibrierungsnetze werden am Boden vermessen um Messunsicherheit zu minimieren und mögliche Verzerrung direkt detektieren zu können und als Folge die erforderliche Genauigkeit zu erreichen [3].

Um die Empfangs- und Sendepfad zu messen sind verschiedene Kalibrierungsschleifen im System umgesetzt. Am Anfang und Ende jeder Datenübernahme werden drei Pulse durch drei unterschiedlichen Pfaden geleitet: Sendepfad (Tx), Empfangspfad (Rx) und Zentralelektronik, der die mögliche Schwankungen in den zwei ersten Pfaden ausregelt [7].

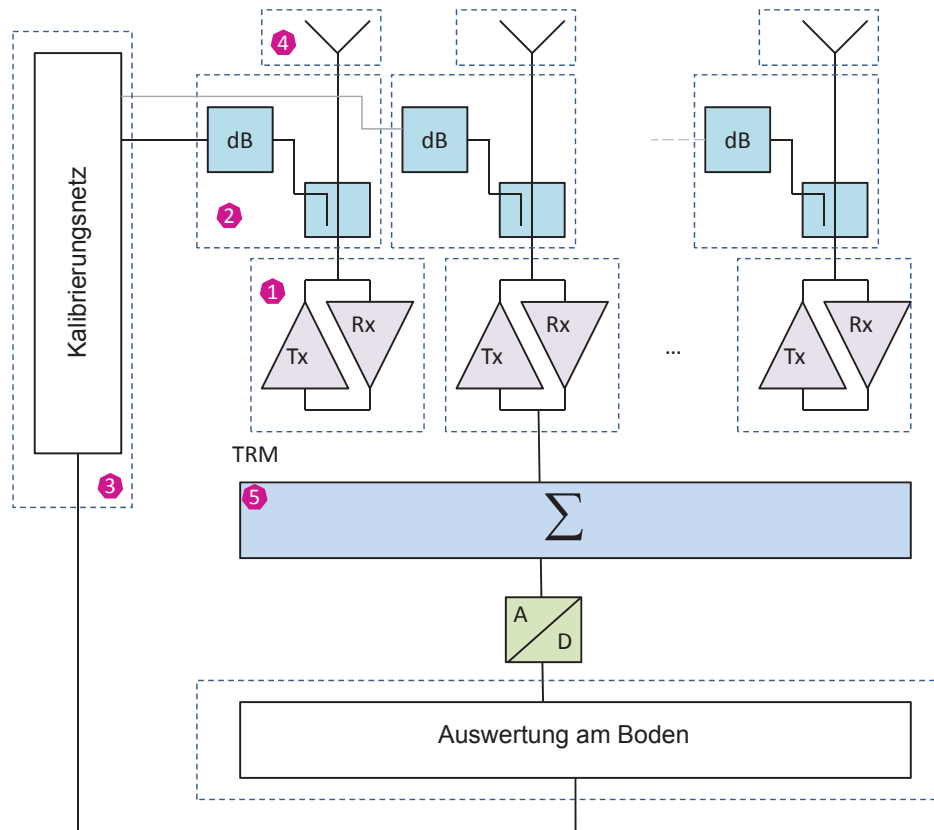


Abbildung 2.1: Interne Kalibrierungsprozess unter Verwendung von TR-Modulen

In Abbildung 2.1 ist der interne Kalibrierungsprozess dargestellt. Mit Hilfe des Kalibrierungsnetzes (3) und Kopplers (2) kann ein bekanntes Bezugssignal in dem Empfangspfad vom TR-Modulen (1) eingespeist werden. Damit ist der Rx-Pfad gekennzeichnet. Der Tx-Pfad wird analog durch denselben Koppler gemessen. Ein kleines Teil des Signals wird daher abgezogen und durch das Kalibrierungsnetz zu den Empfängern geführt. Die Antenne (4) ist nicht Teil der Kalibrierschleife. Deshalb sind ihre resultierenden Fehler bei diesem Prozess nicht messbar. Schließlich sind kalibrierte Signale aller TR-Modulen in (5) zusammengefasst. Die sind aber addiert und stellen den aktuellen Zustand des Geräts nicht dar [3]. Anhand der Messung dieser Signale können die summierten Fehler bestimmt werden.

### Transmit/receive Module Korrektur

Die Kalibrierung von SAR-Systemen dient in Wesentlichen der Bestimmung von den TRM Fehlern. Sie sind programmierbare Bauteile, die die Strahlablenkung durch verschiedene Phasenwerte in beiden Übertragungsrichtungen steuern. Ihre vollständige Blockschaltbild ergibt sich damit entsprechen Abbildung 2.2 Bei der internen Kalibrierung sind hunderte TR Module im Einsatz, die die Phase und Amplitude der Antennenelemente steuern. Die Geräte- und Antennendiagrammstabilität werden durch mehrdimensionale Korrekturtabellen (Temperatur,

Leistung, Polarisation, Rx/Tx) erreicht, die am Boden gemessen werden. Diese Korrekturta-  
bellen sind in jedem-TR Modul gespeichert [3].

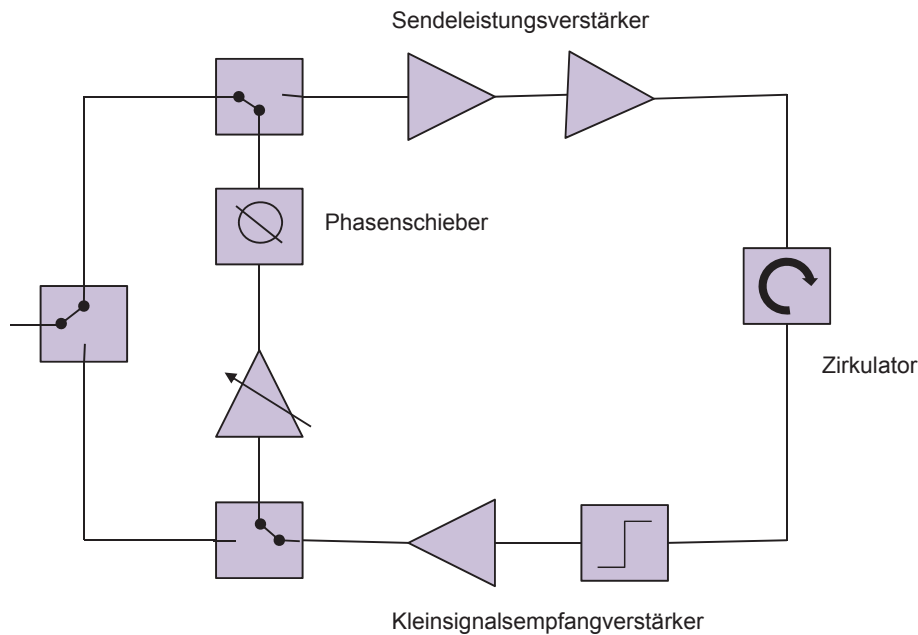


Abbildung 2.2: Blockschaltbild eines Transmit/Receive Moduls (TRM)

### 2.2.2 Zuverlässigkeit der internen Kalibrierung

Durch die Einspeisung der Kalibrierpulse können zwei wichtige Informationsquellen für die Datenverarbeitung am Boden generiert werden:

1. Ausgleich des Gerätedriftes durch Auswertung der Amplituden- und Phasenverhalten im Zeitablauf während der Bildaufnahme (Azimut Drift Ausgleich)
2. Generierung eines Referenzsignals (Replica° um eine realistische Bezugsfunktion für SAR Datenkompression zu bilden [8].

Neben der Messung von Gerätestabilität ist es ebenfalls notwendig Informationen über die Leistung jedes TR Moduls abzufragen. Die Streuung des Antennenstrahls ist von dem Erregungsfaktor abhängig, der den Gewinn und Phase der TR Modulen definiert. Deshalb muss der aktuelle Zustand der TR Modulen besonders bezüglich ihrer Leistungsabschwächung und Betriebsstörung bekannt sein. Die telemetrische Daten wie die Temperaturabhängigkeit und Spannung der TR Module sind am Boden gekennzeichnet, was nur begrenzte Informationen über der Radarleistung liefert [9]. Ein einzelner TR-Modul kann nur gemessen werden wenn alle anderen Module ausgeschaltet sind. Wegen der unterschiedlichen Stromversorgung können die TR Module diese Methode nicht ausführen. Dank der PN-Gating Methode, die von dem deutschen

Zentrum für Luft und Raumfahrt(DLR) entwickelt ist kann eine ausführliche Analysis jedes TR Moduls durchgeführt werden [10]. Die TRM Signale sind dabei mit einem Pseudozufall-Code (*eng: Pseudo-Noise PN Code*) angeregt. Dies ermöglicht eine Beschreibung einzelnen TR Modulen während alle Module im Betrieb sind.

Da die interne Kalibrierung auf eine Serie von Pulse basiert, die im Signalpfad eingespeist werden kann das Radar nicht genau beschrieben werden. Der Antennengewinn, die Strahlungs-kenndaten und der Einfluss des Polarisationschalters sind dabei nicht berücksichtigt da sie sich außerhalb der Kalibrierschleife befinden. Deswegen sind zum Beispiel beidseitige Kopplungseffekte zwischen Stahlelemente, thermoelastische Deformationen oder thermische Schwankungen der Antenne nicht von der internen Kalibrierung überprüft [7]. Deshalb ist es notwendig eine externe Kalibrierung dazu zu verwenden.

## 2.3 Externe Kalibrierung

Wie schon geschrieben kann die interne Kalibrierung nicht ausreichende Informationen liefern, um die SAR Bilddaten selbst zu kalibrieren. Daher ist es schwer alle Verluste und Gewinne eines SAR System total auszugleichen. Deshalb kommt häufig eine externe Kalibrierung als Ergänzung zum Einsatz. Sie wird mit dem SAR System in der Umlaufbahn ausgeführt unter Verwendung von Referenzziele mit bekannten Streueigenschaften. Durch Messung des gesamten Systems mit getrennten Bodenzielen können die systematischen Fehler abgedeckt werden. Als Folge wird die benötigte geometrische und radiometrische Produktqualität bei der geophysikalischen Referenzeinheit wie die sogenannte Radarquerschnitt (RCC) erreicht [8]. Die Kalibrierziele(*eng: Targets*) müssen nicht eines hohes RCS haben sondern auch unempfindlich bezüglich Ausrichtung relativ zum Radar über einen großen Winkelbereich. Diese Eigenschaft kann anhand der Halbwertsbreite der RCS Richtcharakteristik beschrieben werden [11]. Der Erfolg einer externen Kalibrierung ist durch fünf Eigenschaften der Referenzziele beeinflussbar:

1. großer Radarquerschnitt (RCS)
2. breites RCS Richtcharakteristik
3. kleine physikalische Größe
4. stabiles RCS
5. Unempfindlichkeit des RCSs von der Umgebung

Man unterscheidet zwei Arten von Referenzzielen: passiven und aktiven.

**Passive Referenzzielen** sind mechanische Bauteile, die ein genau bekanntes Rückstreuverhalten besitzen. Dabei werden die Kalibrier-Messdaten durch die Messung der Rückstreuoeffizienten während des Betriebs und ihres Vergleich mit den Sollwerten abgeleitet. Beispiele dafür sind Winkelreflektoren.

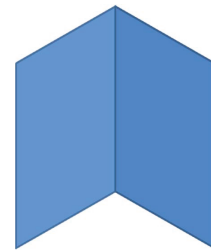


Abbildung 2.3: Schema eines Winkelreflektors

**Die aktive Referenzziele** arbeiten nach der Transponderprinzip. Sie empfangen die Radarsignale, verstärken sie auf derselben Frequenz und senden sie wieder zurück. Ihre Baugröße ist im Vergleich zu den passiven Zielen kleiner.

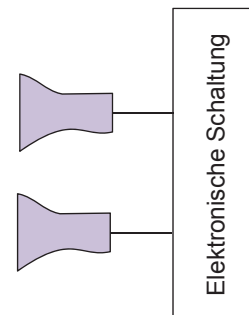


Abbildung 2.4: Blockschaltbild Transponders

Sowohl aktive als auch passive Kalibrierziele werden innerhalb der Streifenbreite positioniert und während bestimmter Kampagnen als auch in der betriebsphase gemessen. Dies ermöglicht die Überprüfung der Form der Antennendiagramme, des Leistungsniveaus und die Gerätestabilität, die zu der radiometrische Kalibrierung führen. Anhand der externen Kalibrierung wird die Tx Richtcharakteristik durch direkte Messung gewonnen während der Rx Kenngrößen der Richtcharakteristik von dem SAR-Bild geschätzt werden. Ferner ermöglicht die hohe Reflektivität der Kalibrierziele eine genaue Messung der Impulsantwort des Systems. Die Kalibrierziele müssen eine größere Antwort als das sogenannte Clutter<sup>1</sup> liefern. Um die gewünschte Genauigkeit der SAR-Daten zu erreichen und dementsprechend die kleine Maßabweichungen messen zu können ist es gebräuchlich Ziele mit höhere Genauigkeit herzustellen, die interne Kalibriernetze enthalten [3].

Unter der externen Kalibrierung unterscheidet man zwischen geometrische und radiometrische Kalibrierung.

---

<sup>1</sup>sind unerwünscht, da sie die Entdeckungswahrscheinlichkeit der richtigen Ziele verringern

### 2.3.1 Geometrische Kalibrierung

Die geometrische Kalibrierung von SAR-Systemen stellt sicher, dass alle Objekte am Boden in der richtigen Position im SAR-Bild abgebildet werden [12]. Der Zweck dieser Art von Kalibrierung ist die geometrische Zuordnung des SAR-System zu der Erdoberfläche [13]. Mit der Verwendung von GPS (*Global Positioning System*) ist die Position des SAR-Bilds in einem geographischen Koordinatensystem bestimmt. Allerdings gibt es zwei Faktoren laut, die die Ortsbestimmung der Erdobjekte verfälschen:

1. Die interne elektronische Zeitverzögerung
2. Die Reichweite Offset-/Ausbreitungsverzögerung durch hydrostatische Effekte

Deshalb muss als erster Schritt geprüft werden, ob die GPS-Zeit mit den Radar Daten synchronisiert ist. Gegen beide Effekte sind zum Beispiel bei der TerraSAR-X Kalibrierung Winkelreflektoren angewendet, die keine zusätzliche elektronische Zeitverzögerung haben und als Folge treten keine zusätzliche Fehlerquellen auf [13].

### 2.3.2 Radiometrische Kalibrierung

Mittels der radiometrischen Kalibrierung kann geprüft werden, ob die SAR-Bildhelligkeit mit der theoretischen Rechnung durch die Radargleichung übereinstimmt. Dadurch wird der Betrag der Impulsantwort des Radarbilds mit den geophysikalischen Rückstreuquerschnitt (RCS) verknüpft. Mittels der SAR Radargleichung werden die Werte der Bildelementen in normierte Radarquerschnitte RCS umgewandelt [14]. Die SAR Radargleichung beschreibt die Beziehung zwischen des gesendete und des zurückgesteuerten Signal. Im Gegensatz zur geometrischen Kalibrierung, die von der Ortsbestimmung der Ziele abhängt ist die Genauigkeit der radiometrische Kalibrierung auf ein hoher RCS angewiesen. Es ist anzunehmen, dass die radiometrische Kalibrierung für die quantitative Anwendungen der SAR-Bilder sehr wichtig ist [15].

## 2.4 Probleme bei den konventionellen SAR-Systemen

Synthetisches Apertur Radar ist eine hervorragende Bildtechnik für die Fernerkundung der Erde. Die TRM-Technologie hat die Welt der Fernerkundung auf eine weite Ebene gebracht. Durch ihre verschiedenen Methoden wie ScanSAR oder Spotlight hat sie eine hohe Flexibilität und Genauigkeit erreicht. Mit zunehmenden Nachfragen an einer größeren Streifenbreite und einer höheren Azimut-Auflösung sind diese Konventionellen Systeme nicht in der Lage die erwarteten Ergebnisse zu liefern. Weiterhin sind die aktuelle hochmodernen SAR-Missionen wie TerraSAR-X [16], TanDEM-X [17] mit einer aktiven Phased Array Antenne eingerichtet, die im Betrieblichen Ansicht sehr flexibel sind. Dennoch ist die Kalibrierung solcher Systeme mit einer sehr großen Zahl von programmierbaren Elementen sehr aufwendig und teuer. Dazu verursacht

ihre Implementierung einen hohen Leistungsverlust. Aus Abbildung 2.5 ist es zu sehen, dass es

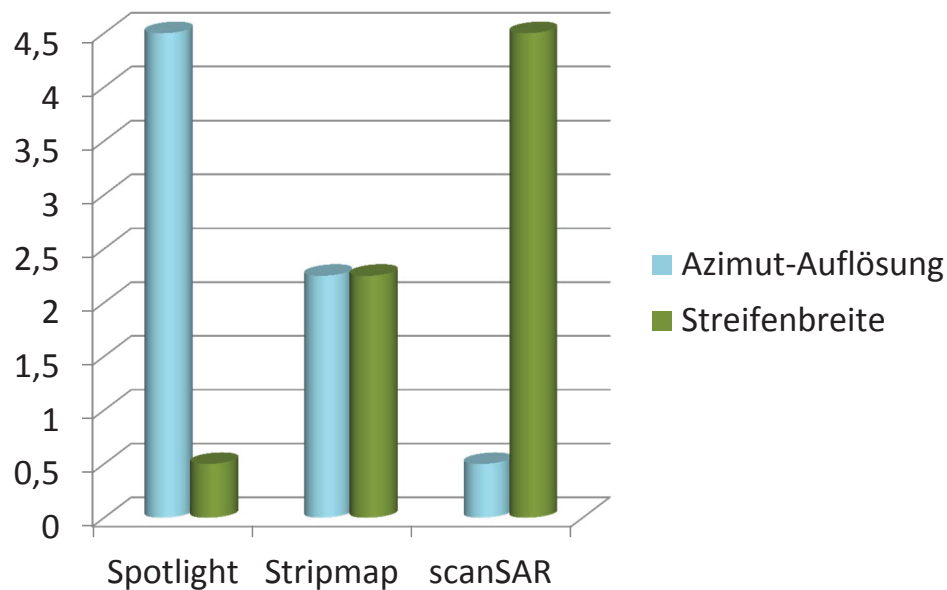


Abbildung 2.5: Konventionelle SAR-Systeme und ihre Möglichkeiten bzgl Auflösung und Streifenbreite

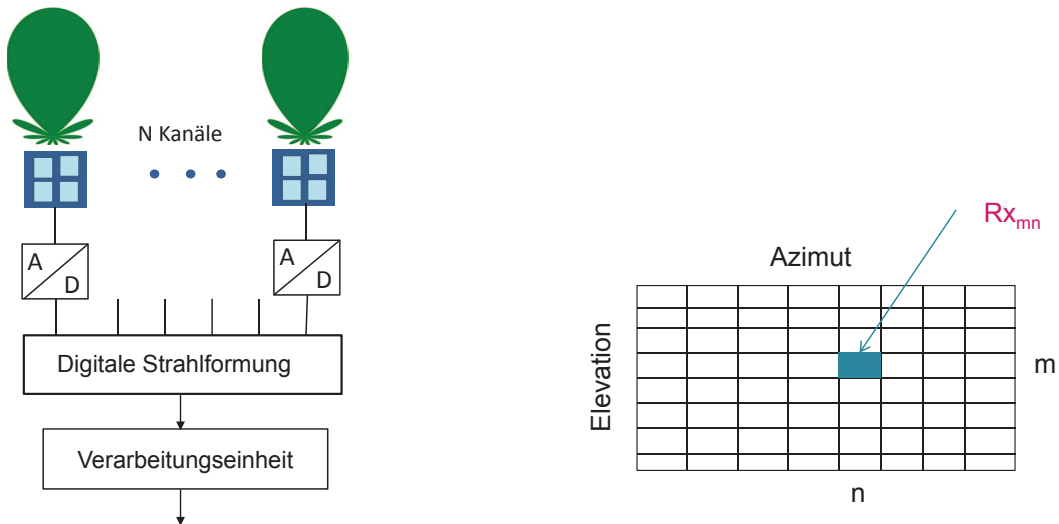
nicht möglich ist beide Maßgaben mit einem höheren Grad gleichzeitig zu erfüllen. Um diese Beschränkungen zu minimieren und mehr Informationen zu gewinnen sind mehrere innovative Technologien entwickelt, die auf Mehrkanal SAR-Systeme basieren [18]

## 2.5 Digitale mehrkanalige SAR Kalibrierung

Fast alle SAR-Systeme arbeiten mit der TRM Technologie. Allerdings entwickelt der technische Fortschritt in der Welt der SAR-Systeme flexibler und effizienter Radarsysteme um die große Anforderung an die globale Erdbeobachtung und Erkundung nachzukommen. Neue SAR-Systeme bieten mehrfache Kanäle, die in *along-track* Richtung getrennt sind um nicht nur hochauflösende Bilder der Erde zu erzeugen sondern auch um Bewegungen zu entdecken. Zum Beispiel bietet der deutsche Satellit TerraSAR-X die Einsatzmöglichkeiten von zwei Kanäle [19]. Der kanadische Satellit Radarsat-2 ermöglicht eine *along-Track* Abtastung durch zwei Kanäle [20]. Der japanische Satellit ALOS-2 verbessert die Azimut-Auflösung auch mittels zweier Kanäle, was es ermöglicht die Bewegungen auf der Erdoberfläche detaillierter zu verstehen. Um die Störstellen der Konventionellen SAR Systeme abzudecken haben die Forscher viele Methoden entwickelt.



Eine vielversprechende Methode ist die digitale Strahlformung im Empfangsmodus (*Digital Beamforming on receive*). Hierbei wird die Empfangsantenne in mehreren Unteraperturen mit unabhängiger Empfangsketten verteilt ist. Wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist kann jede Empfangskette als einzelner Kanal interpretiert werden. Als Folge enthält das System viele digitale Kanäle, wobei an der AD-Wandler näher der Antenne ist. Dadurch ist die analoge Strahlblenkung nicht mehr notwendig und als Folge ist der Einsatz der TR-Module für Phasen- und Amplitudenprüfung überflüssig [21].



(a) Blockschaltbild eines mehrkanaligen SAR-Systems

(b) Empfangsapertur, die in mehreren Unteraperturen in Azimut und Elevation unterteilt ist

Abbildung 2.6: Mehrkanal SAR-System

Im Gegensatz zur analogen Strahlformung mit TR-Modulen werden die von jeder Unterapertur empfangenen Signale getrennt verstärkt, runtermischt und digitalisiert. Dadurch bleibt mehr Info über die zurückgestrahlten Echos erhalten. Diese ermöglichen [22]:

- Die Unterdrückung der räumliche mehrdeutigen Signale (in Azimut sowie in Elevation)
- Die Erhöhung des empfangenen Antennengewinns ohne die Streifenbreite zu reduzieren.
- Die Eliminierung räumlich lokalisierter Interferenzen.
- Der Gewinn von Informationen über das dynamische Verhalten der Streuen und ihre Umgebung.

Dadurch ist es möglich geworden, die Beschränkungen der konventionellen SAR-Systeme zu überwinden. Digitale Strahlformung bietet gleichzeitig sowohl eine gute Streifenbreite als auch eine hohe Auflösung, ohne dass sie abhängig voneinander sind. Deshalb kam die Idee, sie in

SAR-Systeme einzusetzen. Alle Aperturen strahlen dieselbe Fläche am Boden an, egal ob sie in einem einzelnen Plattform oder verteilt sind. Das zurückgestrahlte Signal wird von mehreren Aperturen gleichzeitig empfangen. Im Gegensatz zur Konventionellen System, das nur ein einzeln Signal empfängt kann das Mehrfachapertur-System mehr Daten gewinnen und als Folge genauer und effizienter sein. Dank der digitalen Strahlformung tritt bei dem System kein Leistungsverlust auf.

### 2.5.1 Mehrkanaliges Azimut-Empfangssystem

Das mehrkanalige SAR-System in Azimut hat ein einzeln Sendeapertur und eine Empfangsantenne, die in  $N$  individuelle Aperturen in Azimut-Richtung unterteilt sind. Beide strahlen dieselbe Fläche an. Somit empfängt die Antenne  $N$  Echos für jedes gesendete Signal, wie es in Abbildung 2.7 zu sehen ist.

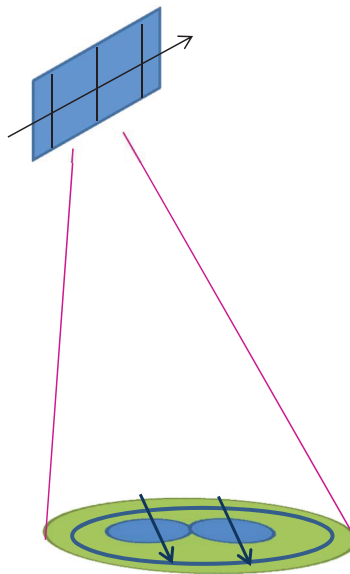


Abbildung 2.7: Strahlen eines Mehkanal SAR-Systems in Azimut

Der Datenstrom jedes Azimut-Kanals wird nach einer möglichen Kompression in einem Datenspeicher am Bord gelagert. Für die Datenauswertung werden die Daten zur Bodenstation übertragen.

Das Mehrfach-Azimut Signal kann eine gute Azimut-Auflösung liefern, sofern der Datenfluss jedes Azimut-Kanals für die spätere Auswertung am Boden getrennt gespeichert ist. Eine einfache Darstellung dieses Systems ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Dabei werden zwei oder mehrere Azimut-Unterarrays verstärkt und kombiniert bevor sie digitalisiert werden. Die Verstärker müssen daher sehr stabil in der Phase sein, um die Summation fehlerfrei zu ermöglichen. In diesem Fall ist es nicht sinnvoll ein Kalibriersignal einzuspeisen, um die Fehler zu bestimmen. Die empfangene Signale sind jedoch schon zusammen kombiniert und es wäre nicht möglich den

Fehler zu korrigieren. Der einzige Vorteil beim Einspeisen dieses Kalibriersignals ist zu wissen, ob es einen Fehler im System gibt und falls ja ein Referenzsignal zu erstellen [3].

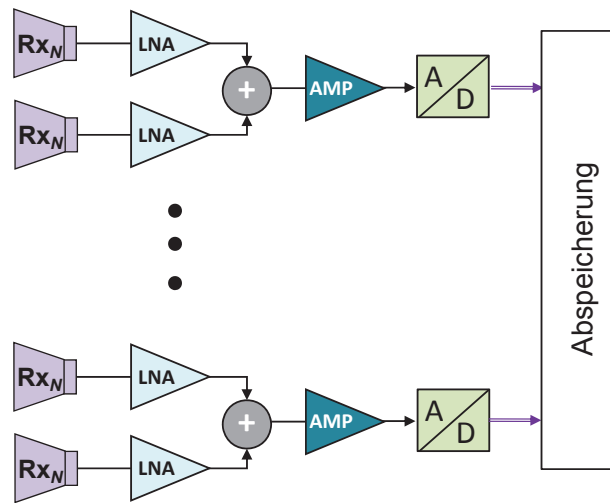


Abbildung 2.8: Blockschaltbild eines mehrkanaligen SAR-System in Azimut

Der Prozess der Datenauswertung für das Mehrkanal Azimut-System basiert auf dem Abtasttheorem. Dieses besagt, dass das Signalspektrum eindeutig rekonstruiert werden kann wenn das Shannon-Nyquist Kriterium erfüllt ist. Das Azimut-System ist dabei als ein System mit linearen Filtern bezeichnet. Die dazugehörige lineare Funktionen ermöglichen die Bestimmung einer Reihe von Gewichtsfunktionen für die genaue Antialiasing Rekonstruktion der Signale [23].

In der Praxis reduzieren unvermeidliche Kanalfehler wie zum Beispiel Gewinn, Phase und Fehlerposition die Effizienz der digitalen Strahlformung. Sobald die Daten des Azimut-System am Boden verarbeitet sind können Algorithmen für die Datenerfassung und die Fehlerkorrektur eingesetzt werden. Beispiele dafür sind:

- Die Methode der Kanal Fehlerabschätzung für Konstellation SAR-Systeme. Sie bezeichnet die Spektrumkomponente im Doppler als „virtuelle Kalibrierquellen“ mit bekannter Richtungen und zerlegt die Kanalfehler in Gewinn-, Phasen- und Flugrichtungspositionsfehler. Bei dieser Methode soll das SAR-System seitwärts schauen (*side-looking*) [24].
- Signal subspace comparison method (SSCM), die für verschiedene Szenen mit hoher Genauigkeit und geringe maschinelle Belastung geeignet ist. Das SAR-System braucht dabei gar nicht seitwärts zu schauen [25].
- Antenna Pattern Method (APM), die für gleichverteilte Szenen geeignet sind. Dank ihrer Kombination mit dem Antennendiagramm kann diese Methode die Phasenfehler ohne Matrizenrechnung und zusätzliche rechenaufwendige Operationen bestimmen [25].

### 2.5.2 Mehrkanaliges Elevation-Empfangssystem

Digitale mehrkanalige Systeme in Elevation basieren auf eine Gruppenantenne. Jedes Bereich ist in mehreren Elementen in Elevation unterteilt. Abbildung 2.9 stellt dies dar.

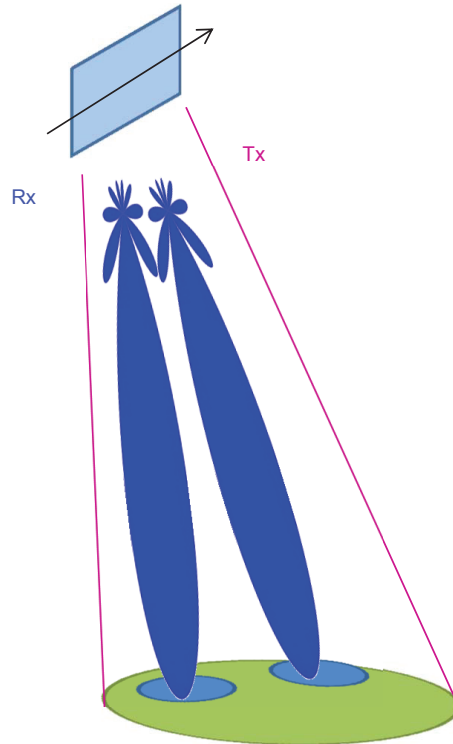


Abbildung 2.9: Strahlsteuerungstechnik eines mehrkanaligen SAR-Systems in Elevation

Die dabei ausgenutzte Strahlformungstechnologie ist die sogenannte *SCan-On-Receive* (SCORE). Sie basiert auf die Generierung eines breiten Sendestrahls, der die ganze Streifenbreite beleuchtet und eines schmalen hochempfindlichen Strahl im Empfangsbetrieb, der das Echosignal am Boden verfolgt. Anbei wird die Digitale Strahlformung am Bord eingesetzt, um die empfangene Signale zusammenzufassen und zu jeden Zeitpunkt ein Antennendiagramm mit hohem Gewinn zu erzielen. Deshalb handelt es sich um eine gewichtete zeitvariante digitale Kombination von den Signalen in Elevation gefolgt von einer Aufsummierung, wie in Abbildung 2.10 dargestellt. Dies reduziert als Folge die Datenrate durch die Eliminierung der Redundanzen. Daher ist diese Datenreduktion im idealen Fall verlustlos [18].

Allerdings ist diese Technik empfindlich gegenüber der Phasenfehler der einzelnen Kanälen [3]. Es wird ein Phasenfehler betrachtet, der einen konstanten Strahlrichtungsfehler verursacht. Als Folge kann der Strahl das Bodenechosignal nicht sehen, was zu einem Rauschempfangssignal führt. Allgemein brauchen die Zeitvariante Gewichte auch eine hohe Genauigkeit, was anhand dieses Systems gar nicht gebräuchlich ist. Die komplexe Multiplikation wird nach der Digitalisierung durchgeführt. Deshalb können die Fehler durch geeignete Methoden minimiert werden.

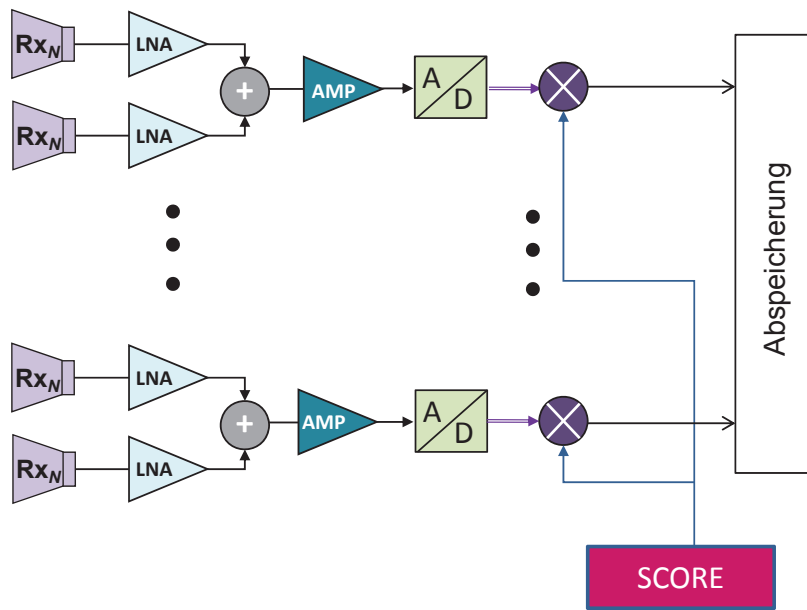


Abbildung 2.10: Strahlsteuerungssystem eines Mehrkanal SAR-System in Elevation

Dazu muss die Kalibrierung bei den Systemen in Elevation in Echtzeit durchgeführt werden. Die konventionelle Kalibrierung, basierend auf die Einspeisung und Aufsummierung ist nicht in der Lage die entstehenden Fehler zu korrigieren. Um dieses Problem zu lösen stellen digitale Kalibriertechniken entwickelt werden. Eine davon besteht darin, das Signal am Bord zu untersuchen. Die Phasen- und Amplitudenoffsets zwischen den Kanälen werden dadurch gewonnen. Dann können die digitale Gewichte wieder errechnet werden um diese Fehler zu entfernen [3]. Eine andere Methode ist die sogenannte datenbasierte Kalibrierung, wobei die Fehlerbestimmung anhand der eigentlichen SAR-Messdaten ist. Diese Methode ist im folgenden Kapitel genauer beschrieben und implementiert und als der Kernpunkt dieser Arbeit betrachtet.



# **3 Digitale datenbasierte Kalibrierung mehrkanaliger SAR-Systeme (DigiCal)**

Gruppenantennen mit digitaler Strahlfomrung besitzen eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen und phasengesteuerten Gruppenantennen. Dank ihrer Flexibilität und Adaptivität können die Amplitude und Phase aller Antennenelemente gesteuert werden. Dabei muss jedes einzelne Antennenelement durch die aktive und passive Bauelemente an einem Sender bzw. Empfänger angekoppelt sein. Wegen der Vielzahl dieser verwendeten Bauelemente befindet sich die Gruppenantenne nach der ersten Betriebsaufnahme in einem unkalibrierten Zustand. Deshalb ist die Kalibrierung solcher Systeme erforderlich um die entstehende Gewinnfehler und Phasenfehler zu korrigieren. Häufig hängen diese Fehler von Umgebungsbedingung ab, die sich mit der Zeit ändern. Mit zunehmenden Interesse an der Verwendung von Gruppenantennen, die eine grosse Zahl von Elemente besitzt ist die Notwendigkeit eine Kalibrierung durchzuführen sehr wichtig geworden. Die Effizienz dieser Systeme ist durch die Güte der Kalibrierung bedingt. Darüber hinaus ermöglicht der Zugriff auf die Empfangenen Signale jedes Element eine Echtzeit-Kalibrierung, was das System vereinfacht und die komplexen Anforderungen erleichtert. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und die Implementierung einer datenbasierten Kalibriermethode, wobei die Korrekturlösung des Systems von den empfangenen Signalen in Echtzeit abgeleitet ist. Dabei wird im ersten Schritt die Entwicklungsgeschichte dieser Methode und ihr Konzept dargestellt. Dann folgt die theoretische Untersuchung des entsprechenden Systems und die Bewertung anhand von Simulationen.

## **3.1 Entwicklungsgeschichte der datenbasierten Kalibriermethode**

Ursprünglich war diese datenbasierte Methode bei der optischen Literatur simuliert [26]. Dabei sind ein paar Merkmale diskutiert, die für die in Echtzeit dynamische Aufhebung der Phasenfehler bei den Fernrohbilder verwendet werden können. Diese Fehler entstehen wegen der atmosphärischen Turbulenzen im Weltraum. Es wurde gezeigt, dass durch die Maximierung der Bildintensität über die Bildkoordinaten nur die originale Position des unverzerrten Bildes gleich bleibt. Danach werde diese Methode weiterentwickelt mit der Einführung von der räumlichen Autokorrelationsfunktion des Feldes , die das selbe Ergebnisse liefert [27]. Als nächstes kam die Idee, diese Vorgehensweise bei Mikrowellen Radar-Bildgebungssysteme einzusetzen. Dabei

wurde ein Algorithmus in [2] entwickelt, basierend auf die Korrelationsfunktion des durch die Streuer entstehenden Feldes. Es wurde dadurch gezeigt, dass die Korrelation zwischen Antennenelementen nur vom Abstand zwischen diesen beiden Elementen abhängt. Unter dieser Annahme kann die Behebung der Fehler direkt ausgeführt werden.

## 3.2 Konzept der digitalen datenbasierten Kalibrierung

Die sogenannte datenbasierte Kalibrierung ist eine geschickte Methode, wobei die Systemfehler anhand der eigentlichen SAR-Messdaten bestimmt werden. Durch die räumliche Kreuzkorrelation zwischen Antennenelementen können diese Fehler mit einem geeigneten Algorithmus direkt behoben werden. Im Gegensatz zu anderen konventionellen Systeme, bei denen Kalibrierungsprozess am Boden durchgeführt ist können die Fehler schon im Raumsegment gehoben werden. Dies ermöglicht eine Vereinfachung des Hardware-Designs und erzielt eine höhere Genauigkeit. Das Blockschaltbild des entsprechenden Prozess ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

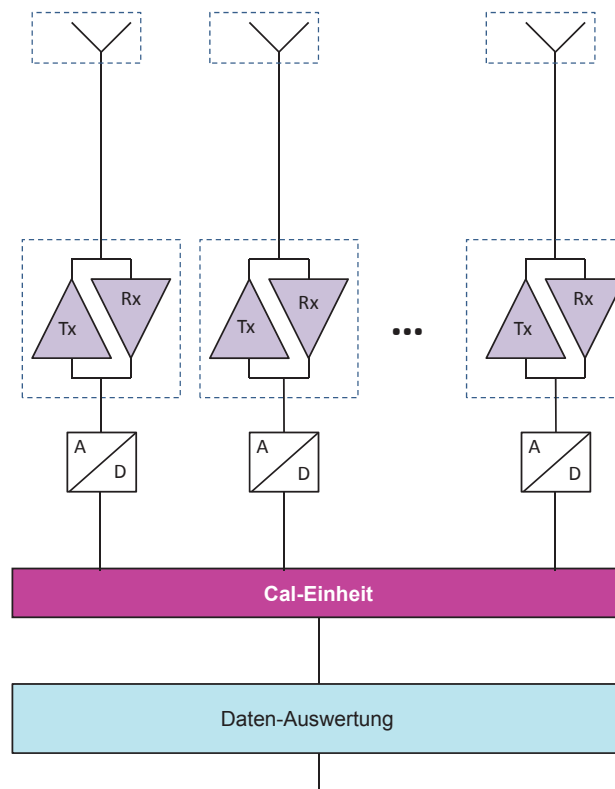


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Konzepts der digitalen datenbasierten Kalibrierung

Dabei ist die Einspeisung eines Kalibriersignals durch ein aufwendiges Kalibrierbetzwerk und Koppler nicht mehr nötig. Die empfangenen Signale werden durch den Digital/Analog-Wandler digitalisiert, ohne dass sie miteinander summiert werden. Damit werden mögliche auftretende



Fehler durch die Kalibrierungseinheit im System eliminiert. Daher kann das SAR-Bild nach der Auswertung der Daten am Boden fehlerfrei generiert werden (Azimut) oder die Daten in Raumsegment weiter verarbeitet werden (SCORE)

### 3.3 SAR-Modell Beschreibung

Ein SAR-System ist in Abbildung 3.2 durch eine planare Gruppenantenne mit  $N$  Elemente im Raum definiert. Dabei erzeugt das SAR-System auf der Plattform eine elektromagnetische Energie, die durch die Sendeantennen ausgerichtet und in Richtung Boden ausgestrahlt wird. Das Sendesignal besteht aus periodisch abgestrahlten Pulsen. Das Zielgebiet, die im Weg des Sendesignals stehen, streuen die elektromagnetische Energie in verschiedene Richtungen. Ein Teil davon wird zu den Empfangsantennen zurückgestrahlt. Die komplexe Reflektivität  $\sigma$  beschreibt jeden Punktstreuer an einer bestimmten Position.

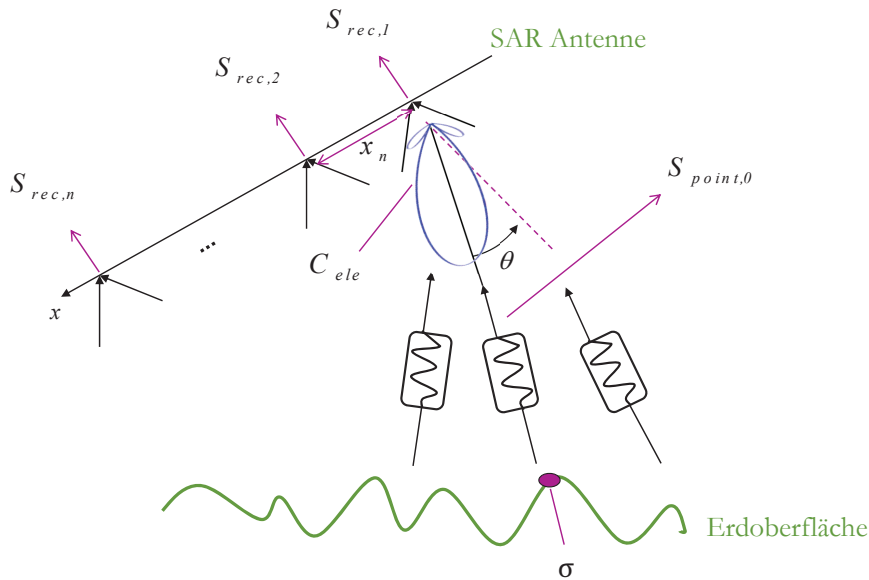


Abbildung 3.2: SAR-Modell

Da die Eigenschaften der Reflektivität und die zurückgestrahlten Signale sehr wichtig für den Kalibrierungsalgorithmus sind, werden die als nächstes genauer betrachtet.

#### 3.3.1 Eigenschaften der Reflektivität

Wenn ein gesendeter Puls auf ein Ziel stößt, wird er in alle Richtungen gestreut. Der wichtigste Anteil davon ist die vom SAR empfangene Signalkomponente. Dieses zurückgestrahlte Signal ist typischerweise viel schwächer als das gesendete. In Abbildung 3.3 sind einige Punktziele mit

verschiedenen Grösse und Positionen und ihren gestreuten Signalen dargestellt. Dabei erzeugen die unterschiedlichen Streuer verschiedene Amplituden je nach ihre Grösse.

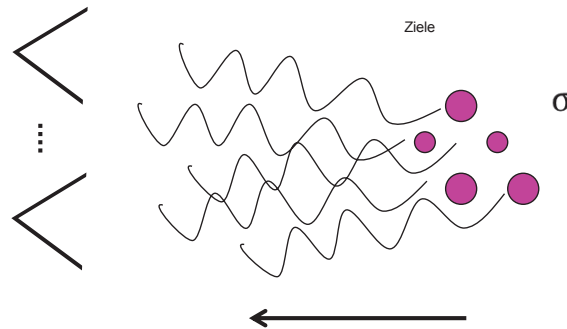


Abbildung 3.3: Streuprozess der Punktziele

Je mehr Zielen es am Boden gibt desto stärker ist das zurückgestrahlte Signal. Die Grösse, die das Radar dabei misst ist die komplexe Summe aller zurückgestreuter Signale. Anhand anderer Radar-Einflussgrössen wird diese Rückstreuleistung in eine andere Grösse umgewandelt, die sogenannte Radar-Reflektivität. In Abbildung 3.4 sind die Verteilung der Punktstreuer über ihre Positionen der Winkel  $\theta$  und ihre entsprechende Reflektivitäten dargestellt. Dabei können die Streupositionen als gleichverteilte Zufallsvariablen betrachtet werden deren zugehörige Reflektivität einer Normalverteilung folgen.

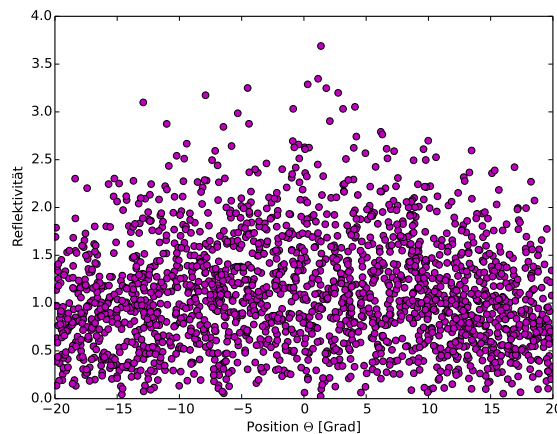


Abbildung 3.4: Verteilung der Punktstreuer und ihre Reflektivität

Die vom SAR bestrahlte Fläche ist als homogen angenommen und auf eine bestimmte Zahl von Bereichen unterteilt. Für jeden Bereich wird eine zufällige Realisierung von Punktstreuer ähnlich wie bei der „Monte-Carlo-Simulation“ durchgeführt. Eine wichtige Eigenschaft der Reflektivität ist ihre Korrelation. Sie ist als die Faltung zwischen den Punktstreuer zu verstehen und liefert ein Delta-Funktion, die in Abbildung 3.12 dargestellt ist.

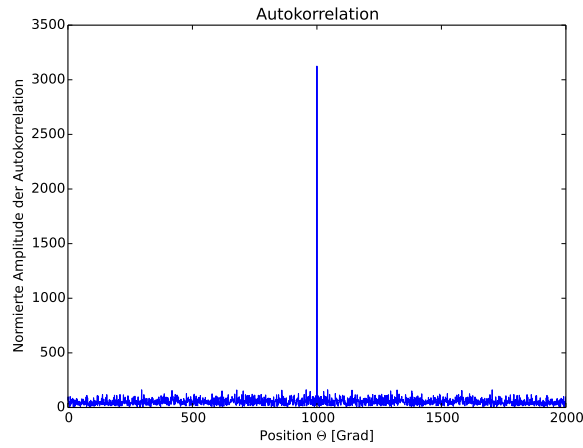


Abbildung 3.5: Korrelation zwischen den Punktsteuer

### 3.3.2 Eigenschaften des Strahls

In Abhängigkeit der Raumrichtung  $\theta$  ist das Signal durch ein Antennendiagramm  $C_{ele}$  gekennzeichnet. Für ein Antennenelement der Länge  $L_A$  beschreibt dieses Antennendiagramm den Strahl jedes empfangenen und wird als eine Sinc-Funktion angenommen. Es ergibt sich dementsprechend:

$$C_{ele}(\theta) = \frac{\sin(\pi L_A \sin(\theta))}{\pi L_A \sin(\theta)} \quad (3.1)$$

Abbildung 3.6 zeigt das Antennendiagramm und seine Kenndaten.

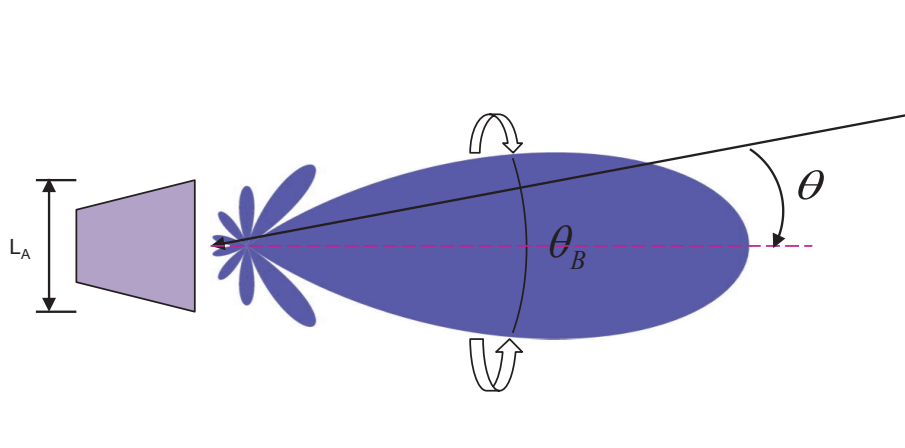


Abbildung 3.6: Antennendiagramm

### 3.4 Analytische Modellierung der empfangenen Signale

Da die dargestellte Kalibriermethode auf die Signaltheorie beruht ist die Untersuchung der empfangenen Signale sehr wichtig.

#### 3.4.1 Empfangssignals eines einzelnen Punktstreuer

Der Abstand zwischen der Antenne und einem beliebigen Punktstreuer ist mit  $r_n$  definiert. In Abhängigkeit der Raumrichtung  $\theta$  wird das Signal durch das Antennendiagramm  $C_{ele}(\theta)$  für nur einen bestimmten Punktstreuer und einen einzelnen Antennenelement  $n$  wie folgend dargestellt:

$$S_{point,n} = \sigma C_{ele}(\theta) e^{-jk(r_n - r)} = \sigma C_{ele}(\theta) e^{-jk\Delta R} \quad (3.2)$$

Hierbei ist  $k$  die Wellenzahl, die mit  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  definiert ist.  $\Delta R$  kann in Abhängigkeit vom Winkel  $\theta$  und der Abstand  $x$  zwischen eines beliebigen Antennenelement und den ersten Element beschrieben werden.

$$\Delta R = x \sin(\theta) \quad (3.3)$$

Die zugehörige Anordnung ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

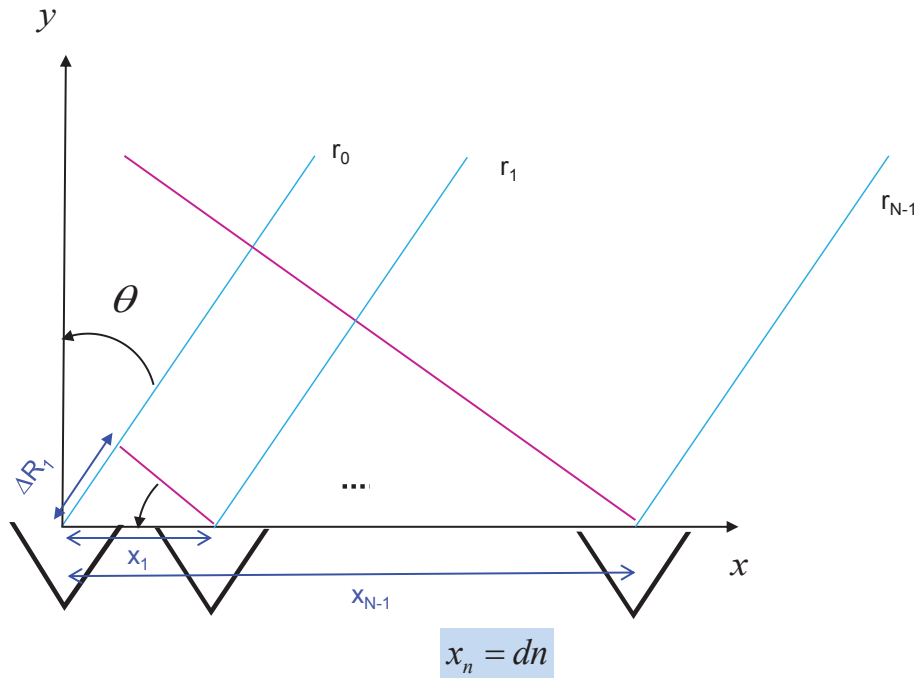


Abbildung 3.7: Lineares Antennensystem für die Darstellung des durch einen Punktstreuer empfangenen Signals

Daraus ergibt sich aus (3.2):

$$S_{point,n} = \sigma C_{ele}(\theta) e^{-jkx \sin(\theta)} \quad (3.4)$$

Mit der Annahme dass,  $u = \sin(\theta)$  und  $C_{ele}$  von  $\sin(\theta)$  abhängig ist vereinfacht sich (3.4) zu:

$$S_{point,n} = \sigma C_{ele}(u) e^{-jkxu} \quad (3.5)$$

und der Vektorschreibweise

$$\vec{S}_{point} = \sigma C_{ele}(u) \begin{bmatrix} e^{-jkx_1 u} \\ e^{-jkx_2 u} \\ \vdots \\ e^{-jkx_N u} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

### 3.4.2 Darstellung des empfangenen Signals durch alle Punktstreuer

An einem Antennenelement sind die einzelne Empfangssignale durch alle Punktstreuer zu einem einzelnen Signal zusammengefasst. Dieses resultierende Signal ergibt sich als das Integral über alle Streupositionen von schon berechneten Teilsignale wie folgt:

$$S_{rec,n} = \int_u S_{point,n} du = \int_u \sigma C_{ele}(u) e^{-jkx_n u} du \quad (3.7)$$

## 3.5 Autokorrelation zwischen Antennenelementen

Die Autokorrelationsfunktion zwischen den empfangenen Signalen beschreibt die Korrelation zwischen den Reflektivitäten mit Berücksichtigung vom Antennendiagramm  $C_{ele}$ . Sie ergibt sich zu:

$$R_{Auto} = E[\sigma(u) C_{ele}(u) \sigma^*(v) C_{ele}^*(v)] = C_{ele}(u) C_{ele}^*(v) E[\sigma(u) \sigma^*(v)] \quad (3.8)$$

Die Reflektivität  $\sigma(u)$  und  $\sigma(v)$  sind unabhängig voneinander für  $u \neq v$  da es keine Zusammenhang zwischen beliebigen zwei Punktstreuer gibt. Deshalb kann ihr Erwartungswert als eine Delta-Funktion geschrieben werden. Es ergibt sich dementsprechend:

$$E[\sigma(u) \sigma^*(v)] \approx \gamma(u) \delta(u - v) \quad (3.9)$$

mit  $\gamma(u) = \sigma(u) \sigma^*(v) = \sigma^2$  als Gamma-Funktion bezeichnet.

### 3.5.1 Simulation der Autokorrelationsfunktion

Für ein System mit 21 Antennen und 2000 Punktstreuern wurde die Autokorrelation zwischen den Antennenelementen ohne -, mit schmalen- und breiten Antennendiagramm simuliert. Das

Antennendiagramm ist als eine Sinc-Funktion definiert. Es ist zu bemerken, dass jede Verteilung der Punktstreuer mit den Antennendiagramm gewichtet. Aus Abbildung 3.8, 3.9 und 3.10 ist leicht zu erkennen, dass die Korrelation zwischen  $\sigma(u)$  und  $\sigma(v)$  unabhängig von Antennendiagramm ist. Für die drei Fällen ergibt sich eine Delta-Funktion mit kaum unterscheidbaren Breiten, was auch mit der theoretischen Rechnung übereinstimmt.

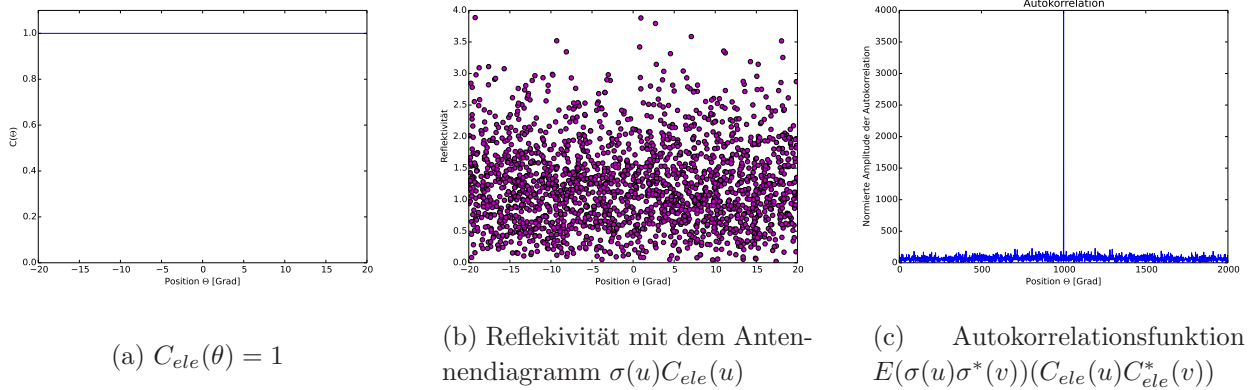


Abbildung 3.8: Die Reflektivitätsverteilung ohne Berücksichtigung des Antennendiagramms und die resultierenden Autokorrelation zwischen Antennenelementen.

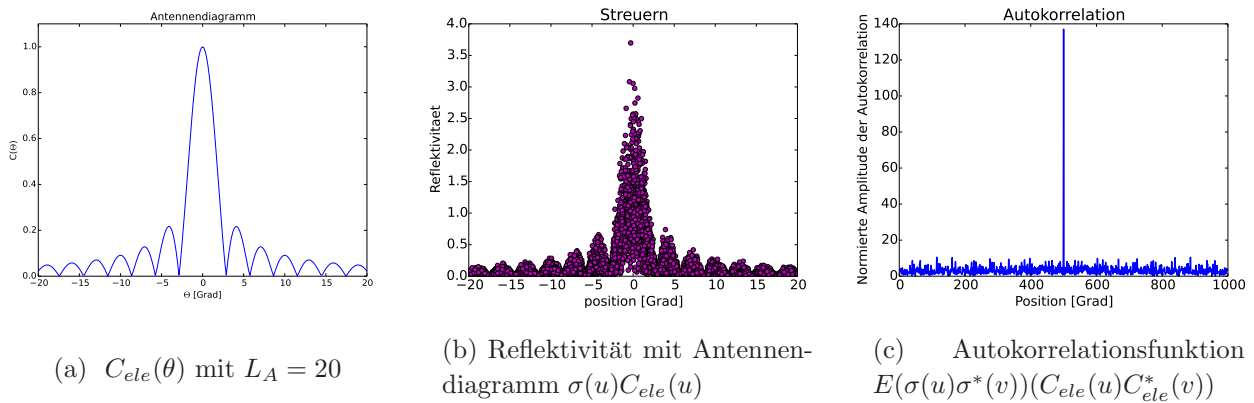


Abbildung 3.9: Die Reflektivitätsverteilung unter Berücksichtigung eines schmalen Antennendiagramms und die resultierenden Autokorrelation zwischen Antennenelementen.

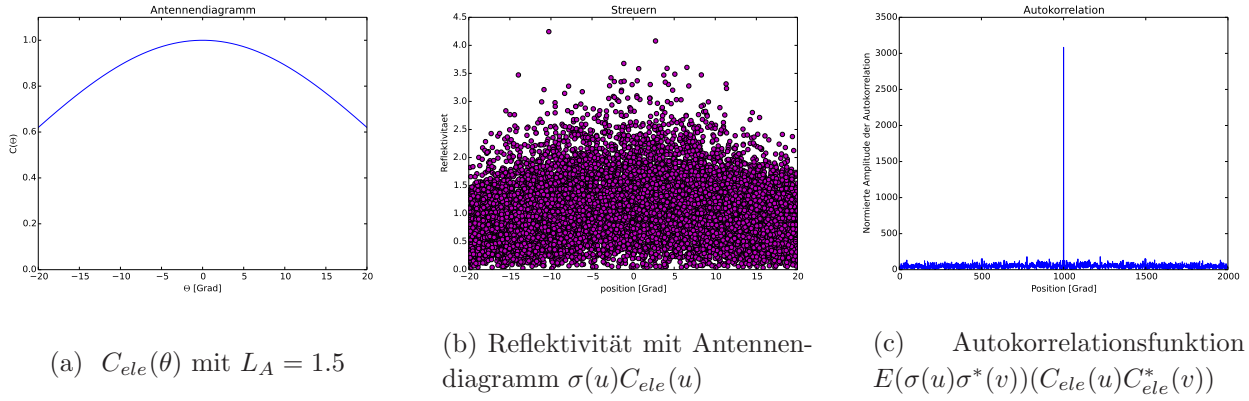


Abbildung 3.10: Die Reflektivitätsverteilung unter Berücksichtigung eines breiten Antennendiagramms und die resultierenden Autokorrelation zwischen Antennenelementen.

### 3.6 Kreuzkorrelation zwischen Antennenelementen

Die Kreuzkorrelation zwischen zwei verschiedenen Antennenelementen<sup>1</sup> mit der Position  $u$  und  $v$  ist gegeben durch

$$R = E[S_{rec,1}(u)S_{rec,2}^*(v)] \quad (3.10)$$

Es folgt aus (3.7)

$$R = E\left[\int \sigma(u)C_{ele}(u)e^{-jkx_1u}du \int \sigma(v)C_{ele}^*(v)e^{-jkx_2v}dv\right] \quad (3.11)$$

$$= E\left[\int \int \sigma(u)\sigma(v)(C_{ele}(u)C_{ele}^*(v))e^{-jk(x_1u-x_2v)}dudv\right] \quad (3.12)$$

$$= \int \int E[\sigma(u)\sigma^*(v)](C_{ele}(u)C_{ele}^*(v))e^{-jk(x_1u-x_2v)}dudv \quad (3.13)$$

Nach Vereinfachungen des Integrals mit (3.9) ergibt sich:

$$R = \int \int \gamma(u)\delta(u-v)(C_{ele}(u)C_{ele}^*(v))e^{-jk(x_1u-x_2v)}dudv \quad (3.14)$$

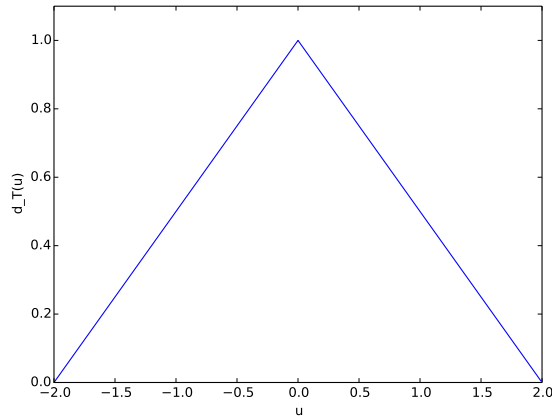
$$= \int \gamma(u)|C_{ele}(u)|^2e^{-jkx_1u}e^{-jkx_2u}du = R(X) \text{ mit } X = x_1 - x_2 \quad (3.15)$$

Diese Korrelationsfunktion entspricht der Fourier Transformation der Gamma-Funktion  $\gamma(u)$  unter Berücksichtigung des Antennendiagramms. Es ist anzumerken, dass die Korrelation zwischen zwei Antennenelementen nur vom Abstand zwischen diesen beiden abhängt und nicht von der Position der beiden Elemente. Das heißt, es ist egal ob es sich um das erste und zweite oder das fünfte und das sechste Element handelt. Hauptsache ist, dass der Abstand zwischen Elementen gleich ist damit die Korrelation auch die gleiche wird. Dieser Schluss haben ATTIA

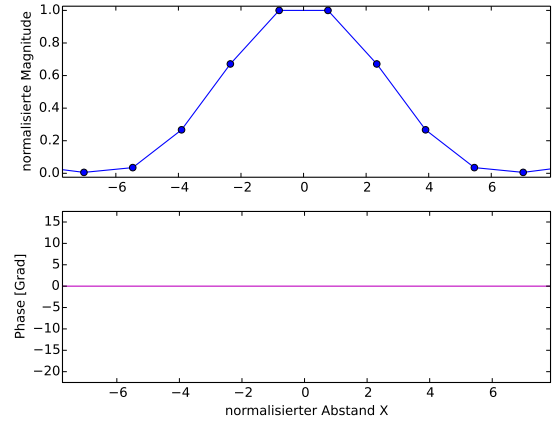
<sup>1</sup>Hier wurde die Kreuzkorrelation zwischen den ersten Elementen berechnet: Antennenelement 1 und 2

und STEINBERG in [2] auch gezeigt. Die berechnete Kreuzkorrelation stellt eine a posteriori Funktion dar und spielt eine große Rolle bei der datenbasierten Kalibriermethode.

Die Gamma-Funktion ist definitionsgemäss reell. Damit auch  $R(X)$  reell wird soll man nur sicherstellen, dass  $\gamma(u)$  symmetrisch ist. Dafür wurde die Kreuzkorrelationsfunktion für jeweils eine dreiecks- und Delta-Funktion simuliert. Wie erwartet ist es in Abbildung 3.11 und 3.12 zu erkennen, dass die Phase immer Null beträgt, was eine reelle Funktion darstellt.

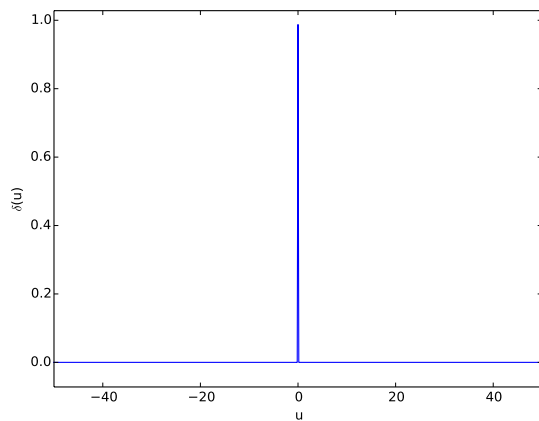


(a)  $\gamma(u) = d_T(u) = \begin{cases} 1 - |u| & \text{für } |u| \leq T \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

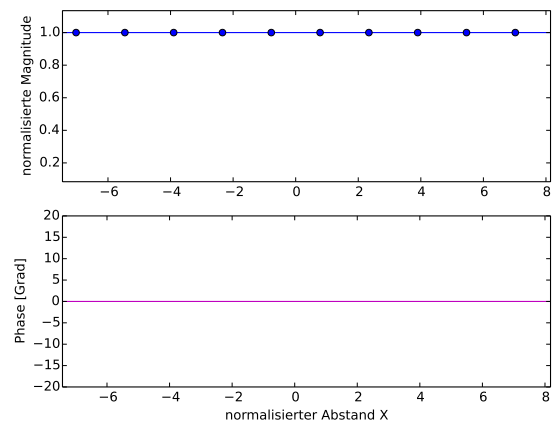


(b) Kreuzkorrelationsfunktion  $R(X)$  ohne Berücksichtigung des Antennendiagramms

Abbildung 3.11: Korrelation mit dreiecks-Funktion



(a)  $\gamma(u) = \delta(u)$



(b) Kreuzkorrelationsfunktion  $R(X)$  ohne Berücksichtigung des Antennendiagramms

Abbildung 3.12: Korrelation mit Delta Funktion



Diese Voraussetzung stellt die Basis des Algorithmus dar. Solange die Phase der a posteriori Kreuzkorrelationsfunktion zwischen den Antennenelementen Null beträgt können die Phasenfehler direkt nach der Bildung der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen den Fehlerbehafteten Signalen bestimmt und korrigiert werden.

### 3.6.1 Simulation der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennenelemente

Für ein System wurde die Korrelationsfunktion zwischen Empfangssignalen für viele zufällige Realisierung von Punktstreuer über viele Bereiche simuliert. Eine Abschätzung dafür ist in Abbildung 3.13 als normierte Amplitude und Phase über den Abstand zwischen den Antennenelementen dargestellt. Dabei stehen die verschiedenen Kurven mit jeder Farbe jeweils für eine einzelne Realisierung. Man erkennt, dass die Kreuzkorrelationsfunktion ihr Maximum immer bei Null erreicht. Bei einem Abstand von Null soll die Kreuzkorrelation theoretisch am größten sein da die Signale identisch sind. Es ist deutlich festzustellen, dass die Korrelation nur von diesem Abstand abhängt. Um die Kreuzkorrelation genauer zu untersuchen wurde der Mittelwert

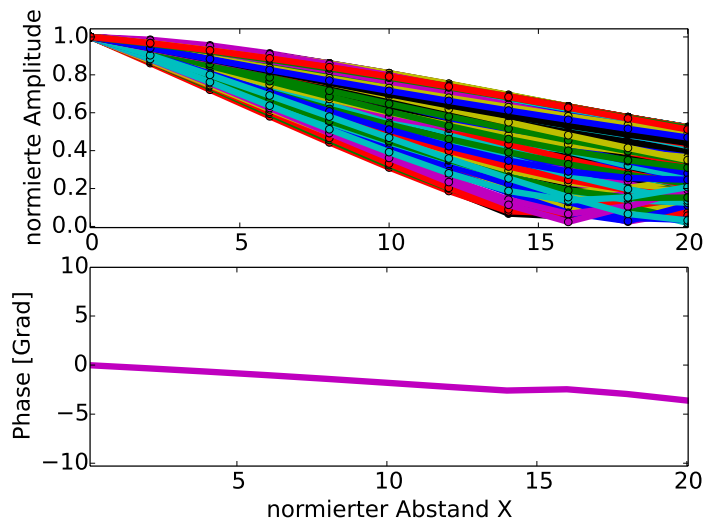


Abbildung 3.13: Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennenelementen für 500 Realisierungen von jeweils 1000 Punktstreuern : Amplitude und Phase

über alle Realisierungen in Abbildung 3.14 gebildet. Die Phase von  $R$ , die einen Kernpunkt dieser Methode darstellt zeigt ein hervorragendes Ergebnis. Wie erwartet ist  $\arg[R(X)] \neq 0$  für die kleineren Abstände. Mit zunehmendem Abstand verliert die Kreuzkorrelationsfunktion ihre reelle Eigenschaft, in dem die Phase von dem Nullzustand sich verschiebt. Typischerweise sind die Signale der benachbarten Antennenelemente besser für die Kalibrierung geeignet.

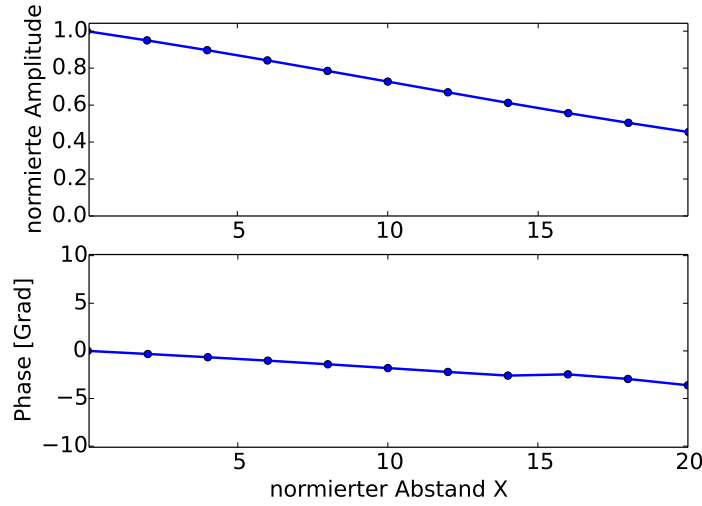


Abbildung 3.14: Mittelwert alle Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Antennenelemente : Amplitude und Phase

## 3.7 Simulationsumgebung mit Fehler

Das Ziel des DigiCal Algorithmus besteht darin, die schon bekannte fehlerfreie Kreuzkorrelationsfunktion mit der gemessene fehlerbehaftete zu vergleichen und das Signal zu korrigieren. Im Folgenden werden die fehlerbehafteten Signale sowie ihre Kreuzkorrelation dargestellt. In Abbildung 3.15 ist der ganze Prozess als ein Blockschaltbild dargestellt.

### 3.7.1 Theoretische Untersuchung der fehlerbehafteten Empfangssignale

Diese im System auftretende Fehler verursachen eine Phasenschwankung in dem Rückstreusignal jedes Antennenelements und werden als  $\phi_{err,n}$  definiert. Somit ist  $\phi_{err,n}$  als eine gleichverteilte Zufallsvariable betrachtet. Folglich ergibt sich:

$$S_{Err,n} = S_{recn} \underline{w}_n e^{-j\phi_{err,n}} = \underline{w}_n e^{-j\phi_{err,n}} \int \sigma C_{ele}(u) e^{-jkx_n u} du \quad (3.16)$$

Des Weiteren wird noch das komplexe Rauschsignal  $n_n$  zu dem resultierenden Signal  $S_{Err,n}$  addiert, was zu

$$g_n = S_{Err,n} + n_n = \underline{w}_n e^{-j\phi_{err,n}} \int \sigma C_{ele}(u) e^{-jkx_n u} du + n_n \quad (3.17)$$

führt. Das Rauschsignal kann mit dem Erwartungswert  $\sigma_n^2 = E[|N|^2] = \frac{E[|S_{rec,n}|^2]}{SNR}$  geschätzt werden.

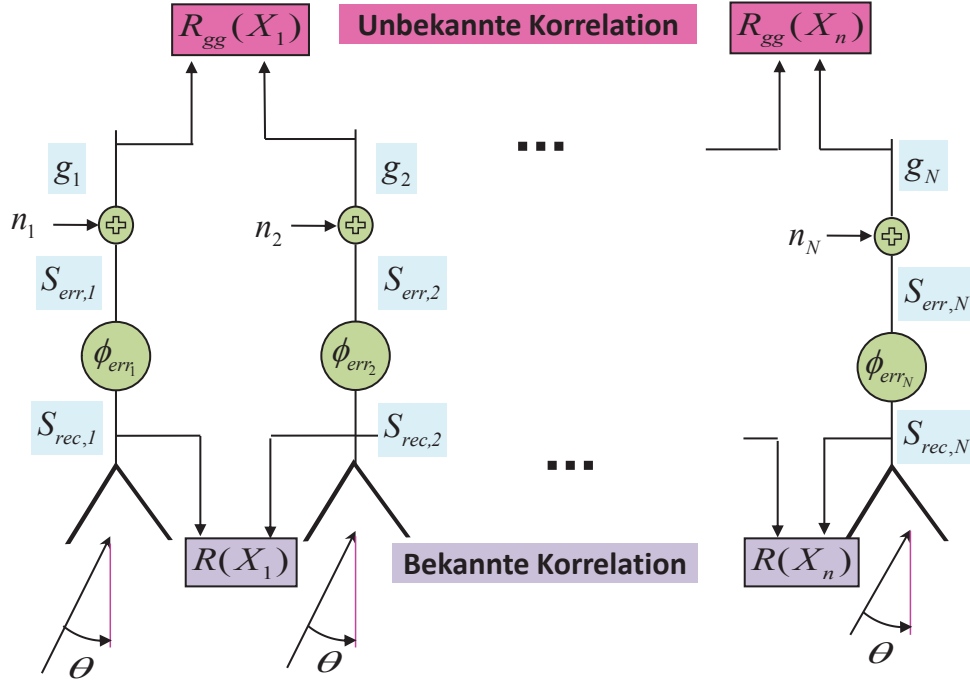


Abbildung 3.15: Blockschaltbild der Simulationsumgebung mit Systemfehler

### 3.7.2 Kreuzkorrelationsfunktion zwischen fehlerbehafteten Empfangssignalen

Die Korrelationsfunktion  $R_{gg}$  zwischen zwei fehlerbehafteten Empfangssignalen mit der Position  $u$  und  $v$  ist analog zu  $R(X)$  gegeben durch:

$$R_{gg} = E[g_1(u)g_2^*(v)] \quad (3.18)$$

Es folgt aus (3.17)

$$\begin{aligned}
 R_{gg} &= E[(\underline{w}_1 e^{-j\phi_{err,1}} S_{Err,1} + n_1)(\underline{w}_2 e^{j\phi_{err,2}} S_{Err,2}^* + n_2^*)] \\
 &= E[\underline{w}_1 \underline{w}_2 e^{-j(\phi_{err,1} - \phi_{err,2})} S_{Err,1} S_{Err,2}^* + n_1 \underline{w}_2 e^{j\phi_{err,2}} S_{Err,2}^* + n_2 \underline{w}_1 e^{-j\phi_{err,1}} S_{Err,1} + n_1 n_2^*] \\
 &= E[\underline{w}_1 \underline{w}_2 e^{-j(\phi_{err,1} - \phi_{err,2})} S_{Err,1} S_{Err,2}^*] + \underbrace{E[n_1 \underline{w}_2 e^{j\phi_{err,2}} S_{Err,2}^*]}_{=0} + \underbrace{E[n_2 \underline{w}_1 e^{-j\phi_{err,1}} S_{Err,1}]}_{=0} + E[n_1 n_2^*] \\
 &= E[\underline{w}_1 \underline{w}_2 e^{-j(\phi_{err,1} - \phi_{err,2})} \int \sigma(u) C_{ele}(u) e^{-jkx_1 u} du (\int \sigma(v) C_{ele}^*(v) e^{-jkx_2 v} dv)^*] + \sigma_n^2 \\
 &= E[\underline{w}_1 \underline{w}_2 e^{-j(\phi_{err,1} - \phi_{err,2})} \int \int \sigma(u) \sigma^*(v) (C_{ele}(u) C_{ele}^*(v)) e^{-jk(x_1 u - x_2 v)} du dv] + \sigma_n^2 \\
 &= \underline{w}_1 \underline{w}_2 e^{-j(\phi_{err,1} - \phi_{err,2})} \int \int E[\sigma(u) \sigma^*(v)] (C_{ele}(u) C_{ele}^*(v)) e^{-jk(x_1 u - x_2 v)} du dv + \sigma_n^2 \\
 &= \underline{w}_1 \underline{w}_2 e^{-j(\phi_{err,1} - \phi_{err,2})} \int \int \gamma(u) \delta(u - v) (C_{ele}(u) C_{ele}^*(v)) e^{-jk(x_1 u - x_2 v)} du dv + \sigma_n^2 \\
 &= \underline{w}_1 \underline{w}_2 e^{-j(\phi_{err,1} - \phi_{err,2})} \int \gamma(u) |C_{ele}(u)|^2 e^{-jku(x_1 - x_2)} du + \sigma_n^2 \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

### 3.7.3 Simulation der fehlerbehafteten Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennenelementen

Mit denselben Daten des fehlerfreien Systems ist die gemittelte Kreuzkorrelation zwischen den fehlerbehafteten Signalen über verschiedene Realisierungen in Abbildung 3.16 dargestellt. An alle Antennenelemente ist ein Rauschsignal mit  $SNR = 10dB$  sowie ein zufälliger Phasenfehler im System hinzugefügt.

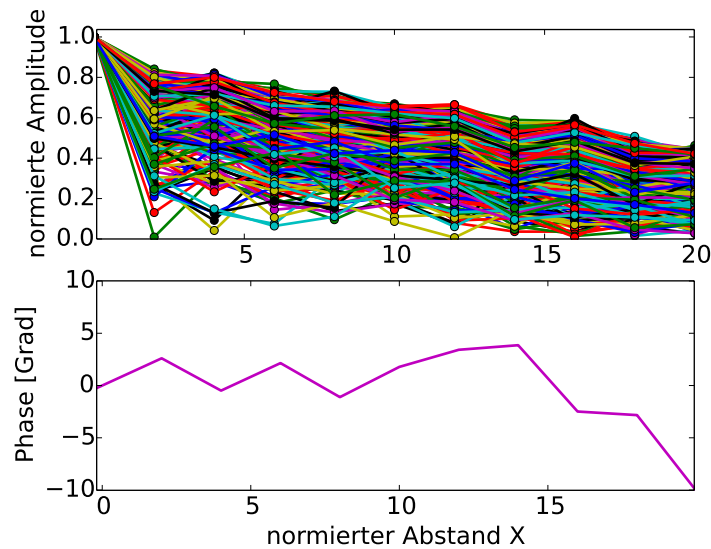


Abbildung 3.16: Fehlerbehafteten Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennensignalen über 500 Realisierungen von 1000 Punktstreuern: Amplitude und Phase

Die Mittlere Phase in Abbildung 3.17 weicht von dem Nullwert ab, was die Wirkung der additiven Fehler darstellt. In Bezug auf die bekannte ideale Kreuzkorrelation können die Signale jedoch wieder korrigiert werden.

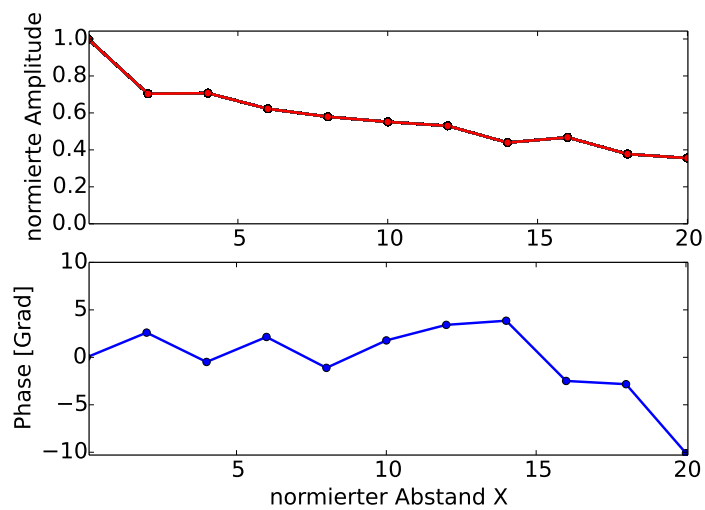


Abbildung 3.17: Mittelwert der fehlerbehafteten Kreuzkorrelationsfunktion: Amplitude und Phase



## 4 Simulationsergebnisse der DigiCal

In diesem Kapitel werden Ergebnisse gezeigt und analysiert, die mit dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren errechnet wurden. Das Ziel des digitalen datenbasierten Kalibrierverfahrens ist die Erkennung und Minimierung der möglichen Fehler, die im System auftreten können und die die SAR-Daten verfälschen. Dabei soll die gerechnete Korrelationsfunktion fehlerfreier Signale mit der tatsächlichen Korrelation fehlerbehafteter Signale verglichen werden, um daraus den Fehler zu bestimmen. Im ersten Unterkapitel ist der Restfehler, der nach der Korrektur der Signale übrig bleibt dargestellt und analysiert. Im zweiten Kapitel wird der zugehörige Gruppenfaktor als Beispiel eines Restfehlers gebildet. Schliesslich ist die Effizienz des Algorithmus für Antennenelemente in unterschiedlichen Abständen überprüft.

### 4.1 Vergleich und Restfehler

In Abbildung 4.1 ist die Kreuzkorrelation jeweils für das fehlerfreie System sowie das fehlerbehaftete dargestellt.

Die fehlerfreie Kreuzkorrelation stellt eine Bezugsfunktion für jede Datenaufnahme dar, mit der das Empfangssignal jedes Mal verglichen wird. Daraus können die Fehler im System in Echtzeit und am Instrument eliminiert werden, was dem Ziel der datenbasierten Kalibrierung entspricht. Je höher die Amplitude der bekannten Kreuzkorrelation ist desto genauer ist die a priori Kenntnis der Phasendifferenz zwischen den Elementen. Um die Effizienz des Algorithmus zu überprüfen wird der resultierende Restfehler nach der Korrektur als Matrize berechnet. Für jeden Abstand zwischen den Antennenelementen ist der Restfehler in Dezibel in Abbildung 4.2 dargestellt. Die X-Achse zeigt den Abstand zwischen den Antennenelementen, deren Kreuzkorrelation abgebildet ist. Die erste Spalte entspricht der Kreuzkorrelation zwischen benachbarten Antennenelementen vom Abstand  $d$  und die zweite Spalte der vom Abstand  $2d$  und so weiter. Es ist zu bemerken, dass es ein bestimmtes Farbverlauf gibt. Der Restfehler ist sehr klein, wenn es sich um die Korrelation handelt. Mit zunehmendem Abstand reduziert sich die Kreuzkorrelation und als Folge nimmt der Restfehler zu. Dies begründet die Verdunklung bei der rechten oberen Ecke.

Für jede Spalte der Restfehlermatrize wird der Mittelwert der zugehörigen Elemente berechnet und in Abbildung 4.3 dargestellt. Der Restfehler steigt mit zunehmendem Abstand zwischen den Elementen, wie es bei der Matrize den Fall war.

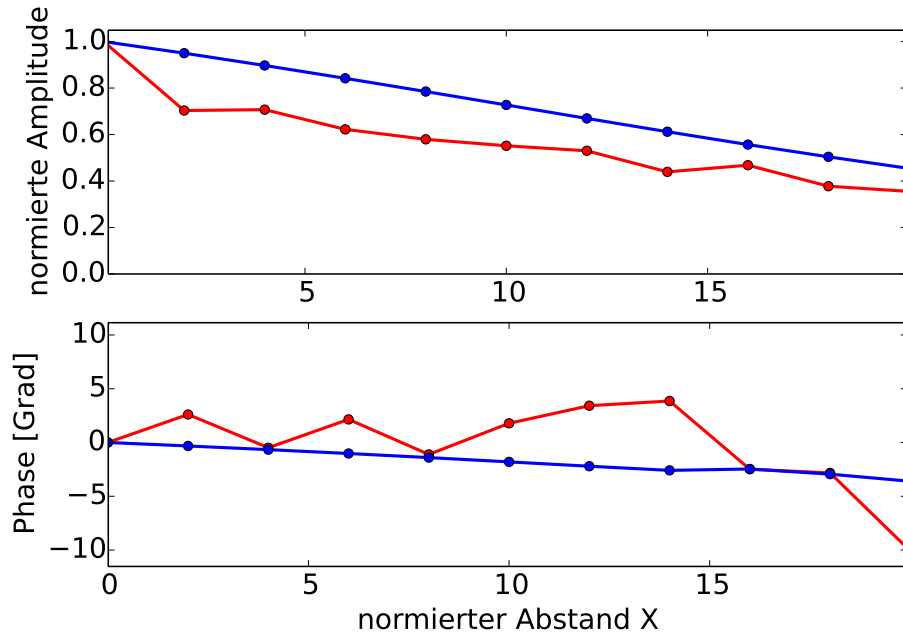


Abbildung 4.1: Vergleich zwischen den Kreuzkorrelationsfunktionen des fehlerfreien System (bekannt) in Blau und des fehlerbehafteten (gemessen) in Rot

## 4.2 Gruppenfaktor

Der Gruppenfaktor beschreibt das Antennendiagramm der Gesamtantenne. Er ergibt sich für  $N$  Antennenelemente zu:

$$AF = \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{j\phi_i + j2\pi \frac{d}{\lambda} i \sin(\theta_i)} \quad (4.1)$$

Er entspricht der Summe von Exponentialgrößen gewichtet mit der Amplitude  $\alpha_i$ . Die Phase jeder Exponentialgröße hängt von der Richtung bzw. dem Winkel  $\theta_i$ , dem Abstand zwischen Elementen  $d$ , der Wellenlänge  $\lambda$  und der Phasenfehler bzw. Phasenrestfehler  $\phi_i$ .

In Abbildung 4.4 ist der Gruppenfaktor für ein Antennensystem mit  $N = 21$  Elementen im Abstand von  $1/\lambda$  dargestellt.

- Die rote Kurve entspricht einer eingespeisten Phase  $\phi = 0$  und stellt den idealen Fall dar.
- Die blaue Kurve entspricht der Einspeisung des Restfehlers nach der Korrektur.
- Die grüne Kurve entspricht der Einspeisung eines Phasenfehlers und stellt den fehlerbehafteten Fall dar.

Bei dem Vergleich von den drei Gruppenfaktoren ist es zu erkennen, dass das korrigierte Empfangssignal fast ähnlich zu dem idealen Fall ist. Dies zeigt die Effizienz des datenbasierten Algorithmus.



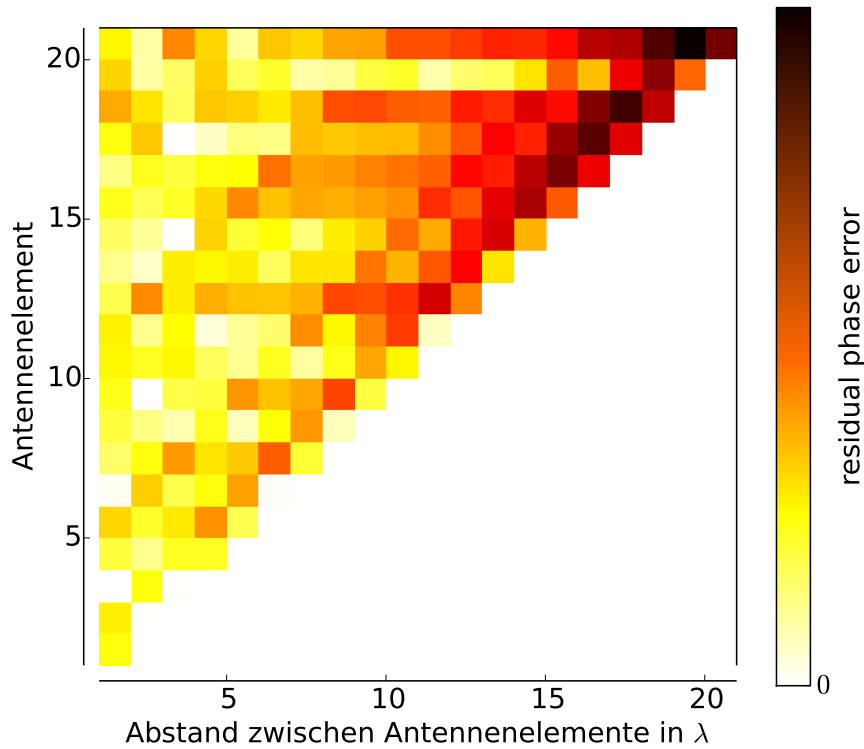


Abbildung 4.2: Restfehlermatrize, wobei die Farbige Positionen der logarithmischen Darstellung der Phasenfehler entspricht

### 4.3 Vergleich verschiedene Elementabstände

Die Kreuzkorrelation zwischen den Antennenelementen ist für ein Antennensystem mit 21 Elementen sowohl in Elevation als auch in Azimut simuliert. Für den Fall in Azimut wird der Abstand zwischen Antennenelementen  $15 \lambda$  angenommen, während für den Fall in Elevation  $1 \lambda$ . In Azimut ist die Antennenlänge sehr groß. Deshalb vergrößert sich auch der Abstand zwischen den Elementen.

Abbildung 4.5 zeigt, dass die Kreuzkorrelation bei der Anordnung in Elevation langsam sinkt. Zwischen dem ersten und letzten Element ist die Kreuzkorrelation noch hoch. Deshalb können fast alle Antennenelemente in der Kalibrierung benutzt werden. Bei den Systemen in Elevation ist der Datenraum von einzelnen Elementen nicht gefüllt [28]. Das Echosignal von einem kleinen Winkelintervall empfangen, während jedes Element einen größeren Bereich bestrahlt. Diese Reduzierung der Datenrate verursacht dank *SCORE* keine Informationsverluste, sondern ermöglicht eine bessere Kalibrierung der gemessenen Daten anhand des implementierten Algorithmus.

Bei der Anordnung in Azimut sinkt die Kreuzkorrelation sehr schnell im Vergleich zum Fall in Elevation. Dabei ist die Länge der Antennenelemente größer. Als Folge vergrößert sich

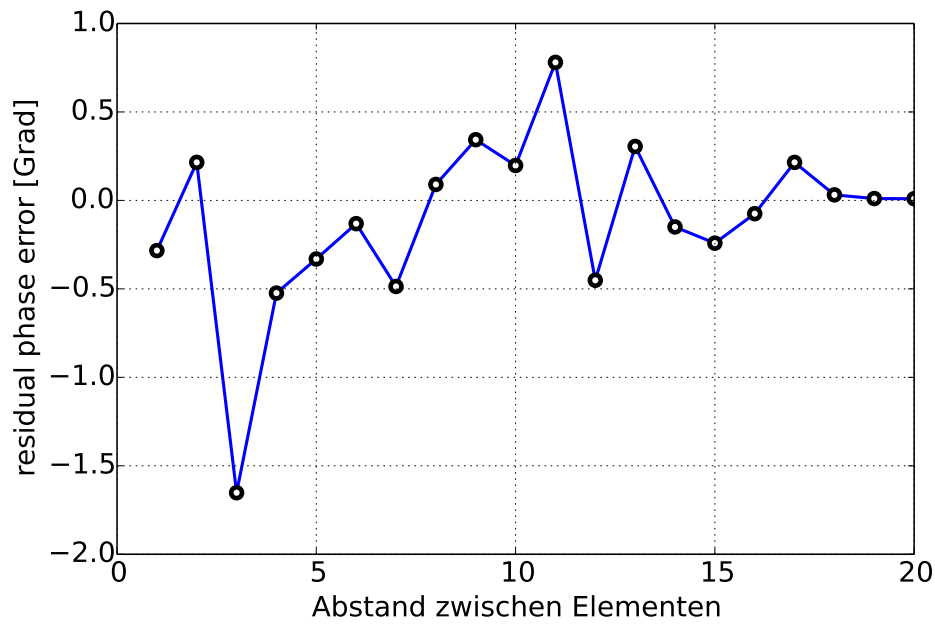


Abbildung 4.3: Die Restfehler über den Abstand als Mittelwert der Elemente jeder Spalte von Restfehlermatrize

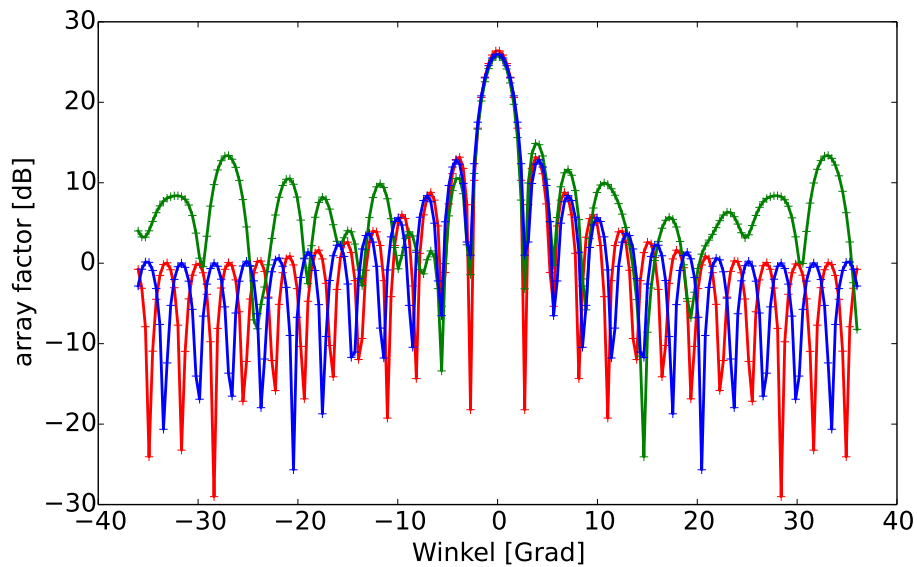


Abbildung 4.4: Ergebnis der Simulation: Gruppenfaktor für den idealen Fall(rot), der mittels des Algorithmus zurückgewonnen Gruppenfaktor(blau), der wegen des Phasenfehlers verzerrte Gruppenfaktor(grün)

der Abstand  $d$  dazwischen, was eine Senkung der Kreuzkorrelation verursacht. Deshalb ist der Algorithmus für diesen Fall nicht gut geeignet, die Fehler zu korrigieren.

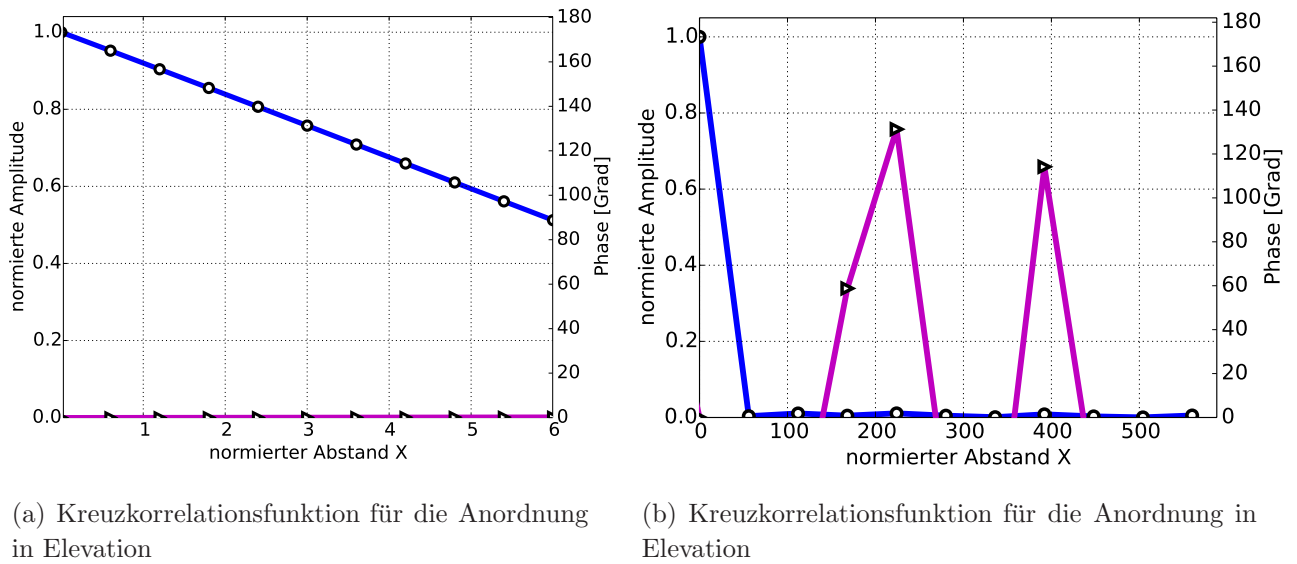


Abbildung 4.5: Vergleich der Effizienz des DigiCal Algorithmus zwischen die Anordnung in Elevation und in Azimut



## 5 Schlussfolgerungen

Da die konventionellen Systeme nicht in der Lage sind eine Kalibrierung der SAR-Messdaten in Echtzeit durchzuführen ist es notwendig innovative Kalibrieremethode zu entwickeln, die das System vereinfachen und effiziente Ergebnisse liefern. Ein Beispiel davon ist die implementierte DigiCal, die eine hervorragende einfache Methode für die Behebung der Systemfehler ist und in Echtzeit durchgeführt werden kann. Dabei ist die Fehlerbestimmung anhand der SAR-Daten, was eine am Instrument gekennzeichnete Kalibrierung darstellt. Die Idee dahinter besteht darin, die Kreuzkorrelation zwischen den Antennenelementen a priori zu berechnen und sie mit der Kreuzkorrelation zwischen den gemessenen SAR-Signalen zu vergleichen. Somit können die Fehler eliminiert und das SAR-System kalibriert werden. Um diese Vorgehensweise zu ermöglichen sind ein paar Voraussetzungen gestellt. Die Kreuzkorrelation zwischen den Antennenelementen bildet die Basis des DigiCal-Algorithmus. Es wurde gezeigt, dass sie nur vom Abstand zwischen den Antennenelementen und nicht von ihrer Position abhängig ist. Solange die Phase der a priori berechnete kreukorrelationsfunktion bekannt ist können die Phasenfehler direkt nach der Bildung der Kreuzkorrelation zwischen den fehlerbehafteten Signalen eliminiert werden. Diese Voraussetzung stellt den Kern des DigiCal-Algorithmus dar. Mit zunehmendem Abstand zwischen den Elementen sinkt die Kreuzkorrelation. Somit steigt der Restfehler im System mit steigendem Abstand. Dank der hohen Kreuzkorrelationsfunktion zwischen Antennenelementen in Elevation ist DigiCal eine hervorragende Lösung für diese Anordnung während es für Azimut nicht den Fall ist.

### *Ein optimistischer Blick in die Zukunft der SAR-Kalibrierung*

Die digitale Welt hat unsere Leben viel vereinfacht und verbessert. Wieso soll dies auch nicht der Fall für die SAR-Technologie? Mit dem Einsatz vom digitalen Prozess bei den SAR-Systemen sollte die Komplexität der konventionellen Systeme reduziert werden. Um die Kalibrierung der SAR-Systeme möglich effizienter und einfacher durchzuführen ist es wichtig solche Algorithmus zu verwenden.



# Literaturverzeichnis

- [1] J. Samuel W.(Walt) McCandless and C. R. Jackson, “Synthetic aperture radar marine user’s manuel,” pp. 10–30, Sept. 2004.
- [2] E. H. Attia and B. D. Steinberg, “Self-cohering large antenna arrays using the spatial correlation properties of radar clutter,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, pp. 30–38, Jan. 1989.
- [3] M. Younis, C. Laux, N. Al-Kahachi, P. López-Dekker, G. Krieger, and A. Moreira, “Calibration of multi-channel spaceborne sar: Challenges und strategies,” in *Proc. European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2014*, May 2014.
- [4] J. P. Ford, “Seasat views north america, the caribbean qnd western europe with imaging radar,” pp. 80–76, Nov. 1980.
- [5] A. Freeman, “SAR calibration: An overview,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 6, pp. 1107–1121, Nov. 1992.
- [6] W. G. . of the Joint Committee for Guides in Metrilogy JCGM/WG 2, *International vocabulary of metrology Basic and general concepts and associated terms*. JCGM, 2008.
- [7] E. Makhoul, A. Broquetas, P. López-Dekker, J. Closa, and P. Saameno, “Evaluation of the internal calibration methodologies for spaceborne synthetic aperture radar with active phased array antennas,” *IEEE Journal on Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, vol. 5, pp. 909–918, June 2012.
- [8] B. Bräutigam, J. Gonzalez, M. Schwerdt, and M. Bachmann, “TerraSAR-X instrument calibration results and extension for TanDEM-X,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 2, pp. 702–715, Feb. 2010.
- [9] B. Bräutigam, M. Schwerdt, M. Bachmann, and M. Stangl, “Individual T/R module characterisation of the TerraSAR-X active phased array antenna by calibration pulse sequences with orthogonal codes,” in *Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium IGAR-SS’2007*, Barcelona, Spain, July 2007.
- [10] D. Hounam, M. Schwert, and M. Zink, “Active antenna module characterisation by pseudo-noise gating,,” in *25th ESA Antenna Workshop on Satellite Antenna Technology*, Noordwijk, Netherlands, 2002.
- [11] F. Ulaby and D. Long, *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. The university

of Michigan Press, 2014.

- [12] J. Fischer, S. Baumgarten, A. Reigeber, R. Horn, A. Nottensteiner, and R. Scheiber, “Radiometric, polarimetric and along-track interferometric calibration of the new F-SAR system of DLR in x-band,” Technical Note.
- [13] M. Schwert, B. Bräutigam, M. Bachmann, B. Döring, D. Schrank, and J. H. Gonzalez, “Final results of the efficient TerraSAR-X calibration method.”
- [14] A. Freeman, “Radiometric calibration of SAR image data.”
- [15] K. EL-Darymli and E. Grill, “Understanding the significance of radiometric calibration of synthetic aperture radar imagery.”
- [16] S. Buckreuss, R. Werninghaus, and W. Pitz, “The german satellite mission TerraSAR-X,” *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, vol. 24, no. 11, pp. 4–9, Nov. 2009.
- [17] G. Krieger, A. Moreira, H. Fiedler, I. Hajnsek, M. Werner, M. Younis, and M. Zink, “TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3317–3341, 2007.
- [18] M. Younis, C. Fischer, and W. Wiesbeck, “Digital beamforming in SAR systems,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1735–1739, July 2003.
- [19] M. Suess, S. Riegger, W. Pitz, and R. R. Werninghaus, “TerraSAR-X design and performances,” May 2004.
- [20] P. Meisl, A. A. Thompson, and A. P. Luscombe, “Radarsat-2 mission: Overview and development status,” no. 11, pp. 373–376, Dec. 2000.
- [21] M. Younis, S. Huber, A. Patyuchenko, F. Bordoni, and G. Krieger, “Performance comparison of reflector- and planar-antenna based digital beam-forming SAR,” *Int. Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2009, June 2009. [Online]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ijap/2009>
- [22] A. Moreira, “Spaceborne radar technologies for earth remote sensing.”
- [23] N. Gebert, “Multi-channel azimuth processing for high-resolution wide-swath SAR imaging,” Ph.D. dissertation, Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), July 2009.
- [24] A. Liu, G. Liao, L. Ma, and Q. Xu, “An array error estimation method for constellation SAR systems,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, no. 4, pp. 731–735, oct 2010.
- [25] T. Yang, Z. Li, Y. Liu, and Z. Bao, “Channel error estimation methods for multichannel SAR systems in azimuth,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 548–552, May 2013.
- [26] R. A. Muller and A. Buffington, “Realtime correction of atmospherically degraded teles-



- cope images through image sharpening,” *J. Opt. Soc. Am.*, pp. 1200–1210, 1974.
- [27] J. P. Hamaker, J. D. O’Sullivan, and J. E. Noordam, “Image sharpness fourier optics, an redundantspacing interferometry,” *J. Opt. Soc. Am.*, pp. 1122–1123, 1977.
- [28] G. Krieger, N. Gebert, and A. Moreira, “Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, no. 1, pp. 31–46, Jan 2008.